原点科幻文库·002

# Wizards, Aliens and Starships

## Physics and Math in Fantasy and Science Fiction

《卫报》2014年度最佳自然科普图书

# 巫师 外星人和星舰

## 科幻与奇幻中的物理数学

[美] 查尔斯·L. 阿德勒（Charles L. Adler）◎著　雒城◎译

特约审稿人◎李剑龙

清华大学出版社

《物理世界》2014年度十佳图书之一

**马克·胡尼亚切克** 《美国数学协会评论》

无论是将其作为课程教材，还是自学读物，你都会发现这本书集趣味性与教育性于一体，且能引人深思。

**西德尼·佩尔科维茨** “科学家的书柜”网站

对那些真正想了解太空旅行的真相或外星生命存在可能性的人来说，《巫师、外星人和星舰》无疑是绝佳选择。此外，它还可作为物理学和天文学课程上引人入胜的补充性读物。

**吴岩** 北京师范大学文学院

作为一本科幻奇幻文学的拓展之书、类型文学作家的参考之书、创意爱好者的学习指南、科技宅人/geek的思考圣经，《巫师、外星人和星舰》在中国的引进和出版是科幻奇幻领域的一个有价值的大事。希望这部作品能带动更多国人的同类创作。

**李淼** 中山大学天文与空间科学研究院

我打算将来在中山大学开一门课，这门课的教材就是《巫师、外星人和星舰》，这门课的课名也许就是“科幻和奇幻中的物理学与数学”。

## 内容简介

从瞬间移形到太空电梯，从外星接触到星际旅行，科幻和奇幻作家笔下的世界总是充满奇思妙想。但是这些奇妙的设定到底是否可信呢？本书运用浅显易懂的数学模型，探讨了包含厄休拉•勒古恩在内的经典著作，以及《星球大战》和《阿凡达》等科幻大片中最富创意的那些细节背后隐藏的物理学和数学原理。本书适用于任何科幻和奇幻读者，不管你是喜欢踏踏实实的技术，还是天马行空的想象，它都会帮助你更好地理解有关科幻与奇幻的一切。

清华大学出版社数字出版网站







上架建议：科普/科幻


ISBN 978-7-302-39422-8

9 787302 394228

定价：59.00元

# Wizards, Aliens and Starships

Physics and Math in Fantasy and Science Fiction

# 巫师、外星人和星舰

科幻与奇幻中的物理数学

[美] 查尔斯 · L. 阿德勒（Charles L. Adler）◎著

雒城◎译

清華大學出版社

**图书在版编目（CIP）数据**

巫师、外星人和星舰：科幻与奇幻中的物理数学 /（美）阿德勒（Adler,C. L.）著；锥城译. --北京：清华大学出版社，2015

（原点科幻文库）

书名原文：Wizards, aliens, and starships: Physics and math in fantasy and science fiction

ISBN 978-7-302-39422-8

Ⅰ. ①巫…　Ⅱ. ①阿… ②锥…　Ⅲ. ①物理学—青少年读物 ②数学—青少年读物　Ⅳ. ①O4-49 ②O1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 032187 号

**责任编辑**：锥　华　王　华
**封面设计**：李召霞
**责任校对**：赵丽敏
**责任印制**：杨　艳

**出版发行**：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn, http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　　邮　　编：100084
社 总 机：010-62770175　　邮　　购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市少明印务有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：165mm×235mm　　印　　张：20.5　　字　　数：366 千字
版　　次：2015 年 8 月第 1 版　　印　　次：2015 年 8 月第 1 次印刷
定　　价：59.00 元

产品编号：060050-01

献给波尔·安德森

他写同一主题更早、更简洁,且更优秀。

# 国外媒体评论

“我也说不清我对这本书的感觉是爱还是恨。爱它是因为它分析了奇幻、科幻作品中众多魔法和太空探索背后的物理学知识，令我为之着迷。恨它是因为它揭示了我永远都无法实现一个梦想的原因。一直以来，我都憧憬着能大喊一声：‘传送我吧，斯科蒂！’，然后完成瞬移。不过，查尔斯·阿德勒又将我拉回了现实……这本书中的物理学知识解释得非常到位，阿德勒举的例子也十分有趣。”

——诺艾尔·安·布拉德肖　《泰晤士高等教育》

“《巫师、外星人和星舰》这本书本身就非常棒，此外，它还可作为学习太空探索所需的物理学知识以及经典科幻作品的入门读物。”

——罗伯特·谢弗　“纽约书评网”

“这本书写得很好，也很有趣，阿德勒为此下了不少工夫。对任何希望创作真正符合科学原则的科幻小说的作者来说，它非常具有参考价值。”

——《大众科学》

“对那些真正想了解太空旅行的真相或外星生命存在的可能性的人来说，《巫师、外星人和星舰》无疑是绝佳选择。此外，它还可作为物理学和天文学课程上引人入胜的补充性读物。”

——西德尼·佩尔科维茨　“科学家的书柜”网站

"《巫师、外星人和星舰》在分析书中相关对象时，将科幻的文学性与科学的严谨性完美地贯穿起来。不论是变形术的质量守恒问题，在霍格沃茨点蜡烛，还是建造一颗行星，阿德勒笔下的科学知识向来通俗易懂，并深受宅男宅女们的喜爱。"

——格伦·达拉斯　《旧金山书评》

"这是一本令人兴奋的书……如果有人对物理学和科幻作品之间的关系感兴趣，我会毫不犹豫地将这本书推荐给他，尤其是讲授物理学入门课程的老师们，这本书可以作为枯燥的物理学课本有价值的补充材料，它甚至可能会提高学生对课程的评价，我肯定会在我的课堂上使用这本书。"

——科斯塔斯·埃夫蒂米乌　《物理世界》杂志

这是一本了不起的书：它用实实在在的物理学法则，解析了科幻作品中富有浪漫色彩的各种情节。它会吸引所有的读者，从《星际迷航》的狂热粉丝到天体物理学家。

——保罗·纳辛　《逻辑学家与工程师》作者

"这本书可读性高、妙趣横生、文笔出色，书中幽默之处众多。显然，阿德勒热爱所有类型的科幻作品——图书、短篇小说、电影和剧集，他乐于从科学的角度思考这些作品……总之，这本书不但全面介绍了众多科幻作品，还可以作为物理学和天文学的入门手册。"

——《选择》杂志

"阿德勒完美地向我们展现出，即便是最基础的数学和物理学也具有强大的力量。如果你是位崭露头角的年轻科学工作者，还对代数学有点兴趣，你会喜欢这本书的。"

——罗伯特·马修斯　《BBC聚焦》

"这本书是一项了不起的成就……它肯定是你在任何地方能找到的所有的教科书里最酷的那本……任何渴望了解何为现实、何为想象的科幻迷或奇幻迷几乎一定会喜欢它，你们可以期待从这本书中了解到，不论是在伟大的文学作品中，还是在真实的宇宙中，到底什么是可能实现的。"

——乔纳森·T.马莱　《探索》杂志

# 从哈利·波特到全球变暖以及戴森球

魔法符合物理学定律吗？霍格沃茨魔法学校校长邓布利多真的能够在挥舞魔杖之间将乱七八糟的房间收拾好吗？他的魔杖真的能将撕碎的书籍复原吗？显然，稍稍学过物理的人会告诉你，这违背了热力学第二定律。同样，一个人能变成白天鹅或者黑天鹅吗？当然不能，因为这违反了质量守恒定律。

如果魔法遵守物理学定律，那还叫什么魔法？你会对这样的物理极客产生反感，可是物理极客不管这一套，他们就喜欢寻根究底。因此，变形魔法包括孙悟空七十二变大有问题，甚至霍格沃茨大厅被成千上万根蜡烛照得光明灿烂也成问题，因为一根蜡烛的亮度差不多是一个灯泡的百分之一。

一个巨人能够在地球上跑动吗？这是一个物理学问题。同样，《阿凡达》里身高三米的纳威人真的能在重力只有地球的百分之八十的潘多拉星上健步如飞吗？要知道答案，我们必须懂一点简单的物理学，而物理学告诉我们，《阿凡达》的设定是有一点点问题的。

除了奇幻小说中的物理学问题，我们更关心科幻小说里各种设定是否与物理学、数学乃至化学相容。比方说，科幻黄金时代预言的大航天为什么迟迟没有到来？是什么样的基本物理学定律限制了航天事业的发展？其实答案并不那么深奥：能量，能量！能量来源限制了航天发展，能量消耗的极大降低却激发了网络时代的大发展，这一点除了克拉克预知了一些，其他科幻作家做梦也没有想到。

还有，可供长期移民的空间站是可行的吗？我们是否可以在未来的二十年之内造出高达数万千米的太空梯？富豪们真的会在不远的将来去火星度假吗？（穷人就别妄想了，你出不起那个钱）。物质反物质湮灭推进器是否可行？如果这个太难，那核聚变推进器呢？如果这些在21世纪都不行，我们放开来畅想，假如技

术原则上可以无限发展，人在寿命所限之下能飞出银河系，甚至旅行到宇宙尽头吗？嗯，这倒不违反相对论。

接下来就是，超光速旅行可行吗？时间旅行可行吗？你会说《星际穿越》貌似是这么设定的，可是你知道这需要改变物理学中的什么常识吗？

这些问题的答案都可以在这本奇书中找到。这本书就是《巫师、外星人和星舰》，作者用最基本的物理学和数学知识就推出了这些答案。我相信你和我一样，每读一页这本书，就会学到关于科幻小说的知识，同时学到了物理学知识。

再有，外星人存在吗？最近我对这个问题特别感兴趣，并且还有自己的理论，我认为外星人并不存在。本来，我以为我是极少数派，读了这本书之后我才得知原来从 20 世纪 80 年代起，人类是宇宙之中唯一的智慧生物的观点已经变得比较流行，当然这局限在西方科幻作家中。中国科幻迷乃至一般公众还认为外星人当然存在。眼下，科幻作家甚至科学家还是分为三派：第一派认为智慧生命在宇宙中十分普遍；第二派认为智慧生命罕见但并不唯一；第三派就是人类中心主义了，我们是宇宙中唯一的文明。嗯，我就是一名人类中心主义者。

撇开这些争议不论，我们到底该如何寻找地外生命和地外文明？这也是本书试图分析的问题之一。粒子物理学家戴森曾经在《科学》杂志上发表过一篇论文，研究是否可以围绕一颗恒星（例如太阳）造一个巨大的球，以收集太阳发出来的全部能量。这可不得了，因为我们知道太阳照射到地球上的能量是太阳辐射的总能量的极小一部分，这个大球球做出来人类就一劳永逸地解决了能源问题。这个宏大的装置叫戴森球，当然戴森并不想发明一个专利为人类谋取福利。你想，要造出这样的巨无霸我们需要的材料将来自整个木星，这实在不太现实，戴森也很难以此成为太阳系首富。他真正的目的是寻找外星人，如果外星人造出了这样的装置，我们就有可能通过这个巨大装置的红外辐射找到他们。

回到地球本身。我们的能源什么时候耗尽，比如石油？地球变暖是真的吗？美俄的核储备真的可以毁灭地球？数亿年后，我们能够逃离太阳系吗？生物的终极形态是什么？你还是能够从这本书中找到一些答案。

在中国，科学幻想小说爱好者是一个比较小众的圈子，尽管刘慈欣《三体》的影响已经开始溢出科幻圈，影响 IT 界，继而影响其他人。《三体》为何能够在 IT 圈产生这么大的影响？答案看上去显而易见，因为该圈的人士现在张嘴闭嘴就是“降维攻击”，可见《三体》里的二向箔才是亮点。另外，刘慈欣的“黑暗森林”的说法影响也不小，也许仅次于“降维攻击”。

多媒体时代，阅读的人越来越少，读小说的人本来就是小众，更不用说科幻小

说了。当然,如果我们将小说的范围扩大到奇幻,圈子就大大地放大了。我知道,中国作家富豪榜排名第一的是唐家三少,他的小说《斗罗大陆》点击量近亿次。另一个有人气的奇幻作家是江南,小说《龙族》每一卷都比任何亚马逊排名第一的书还要畅销。

中国的电影市场还是好莱坞大片主导,好莱坞大片中不少是科幻电影,因此科幻电影在中国受众中影响远远大于科幻小说。说起小说《造星主》大概没有几个人知道,但谁不知道《阿凡达》、《黑客帝国》? 谁不知道《星际穿越》?

遗憾的是,《巫师、外星人和星舰》这本书以科幻小说为主,偶尔谈及科幻电影。幸运的是,这本书还包括了一些著名的奇幻小说,例如我们开始提到的《哈利·波特》,因此,这本书的读者对象应该涵盖了比科幻小说读者多得多的人。

对我本人来说,这本书的出版实在太及时了。正好我的《三体中的物理学》4 月份刚刚出版,我的那本书与这本书有相似之处也有重要的不同点,我们的出发点都是科幻,但这本书更适合对公式感兴趣的人。恰好,过去两年我在中山大学逸仙学院上过《人与宇宙的物理学》这门课,这门课的精神与《巫师》这本书很接近。我打算将来在中山大学再开一门课,这门课的教材就是《巫师》,这门课的课名也许就是"科幻和奇幻中的物理学与数学"。

最后,我表达一下对本书作者的敬意。查尔斯·L.阿德勒是一位职业物理学家,专业是光学,在马里兰的圣玛丽学院任教。1992 年我去布朗大学做研究助理教授的时候,他刚从那里毕业。写这本书并不容易,有人说我的《三体中的物理学》写起来也很难,这不错,可是我的书一年半载是可以写完的,而《巫师》中的内容大概需要好几年的积累。

李　森
2015 年 5 月

李森,中山大学天文与空间科学研究院院长,最酷的理论物理学家,科普作家,诗人,著有《三体中的物理学》、《越弱越暗越美丽》。

# 去科幻/奇幻丛林中探险所需的小小装备

讨论科幻奇幻作品中科学这一主题的书，这两年着实出了一批。

我见到过最早的一本，应该算韩国郑载承的《与物理学家一起看电影》(2003)。这本书围绕一批科幻电影，一部一部分析其中的科学表达跟物理学基本原理和观测数据之间的差异。多数章节最终的结论是，科幻作品中的东西是错的！或者，沿着电影的科学思路，你不达到一个荒唐境界不可能返回现实！

《电影中的科学》(2010)是另一个韩国作品，作者叫崔原硕。这本书跟上面的一本最大的差别是，整个编排顺序遵循了"学科体系"，电影被贯穿其中当例子。这本书对科幻电影的态度相对友好了一点。但你可以看到，作者关心的是科学传播，科幻电影只是传播的"工具"。

在引进外国作品的同时，国人自己撰写的科幻影视中科学主题的读物也陆续出版，这其中最重要的是上海交通大学江晓原教授的《你们准备好了吗？幻想与现实中的科学》(2007)，该书用大量章节给科幻电影做了题材分类。江老师还发人深省地给出两个结论：第一，科学哲学中的"纲领"说可以用于研究科幻电影；第二，外国科幻电影都是悲观的。

上述一些作品我都热切地买了并阅读，但读过之余也感到有些失落。每每读到作者居高临下的阐述或告诫的时候，我都想问：既然你期待我们这些喜欢科幻作品的人也能领悟其中的科学奥秘，那首先你就要对我们这些"科幻迷"或进入剧场观看电影的"普通观众"抱有积极的态度。你应该先同意我们看电影读小说不是浪费时间、更不是要把时间消耗在毫无价值的胡扯中。换句话说，你想要我们接受你，就应该跟我们站在同一个地平线上。

本着这样的科幻迷心态，我再选谈论选择讲述“科幻中的科学”类读物，就变得异常小心。多数市场上的书我都不再购买。直到我看到这本《巫师、外星人和星舰》。

这是一本适合中学以上所有文化程度读者的著作。最重要的是，我欣喜地发现，该书的作者跟我们一样，对科幻作品抱有狂热的喜爱。正是这种喜爱让他不会为了传播自己那点科学知识而故作姿态。而我们也恰恰在这种惺惺相惜、巧遇知己的心态中融入了他所传达的内容之中。

慢慢阅读《巫师、外星人和星舰》，你既像在科幻奇幻作品的历史丛林中进行一次有价值的冒险，也像跟这些虚构世界背后的科学家之间的碰撞和交会。这种一拿起来就放不下的阅读感受，竟然这么简单轻易就开始了，这点让我震惊不已。而且，也不知怎么的，书上为了讲解而呈现的初等数学和基础物理的那些公式数据，也像具有了魔力，走入了我的生活。

读完全书，我对这本书的优点做了如下三点概括。

首先，这是讲述我们这种热爱科学也热爱想象的人，跟科幻奇幻文类反复遭遇的探险之书。作者对他所探险的世界充满爱意。那么多著作的故事和创作掌故，在他的笔下写起来随手拈来，轻松自如。写书的状态就像在展现作者自己的心灵史。我觉得恰恰是这种爱，使他的著作明显在态度上区别于其他科学家讨论科幻奇幻的著作。他的爱，就来自对这块被探索大陆的纯粹向往，而只有充满向往的著作才是洒满阳光的。

其次，跟多数讨论科幻中科学的著作类似，作者想要带领读者学习用科学方法研究问题。在作品中，你发现探险者有一个独特的背包，那其中充满了被称为物理和数学的小小装备。他会不断使用这些装备作为地图或标尺，去衡量或揣摸原著作者的创作意图。我觉得这样的读书，是一种非常好的训练。因为作者肯定他走过的土地，并假设这些土地真实存在，所以在这块土地上的测量和计算，才有着丰厚的意义。

第三，作者对问题的研究，并非仅仅从科学原理出发进行，在更多情况下，他会考虑到深陷科学时代的人所作出的现实选择。例如，如果作品中提到要制造某一类飞行器，作者不单会仅仅就飞行器的状态做科学计算，还会就人类社会是否乐意营造这样的飞行器、成本控制和道德伦理应该怎样配套地被植入进行分析。也正是有这些探险过程的画外音的存在，你发现神秘大陆的探索更加有趣了。

我曾经在北京师范大学教育学部从事科学教育研究五年。那期间我几次到国外参加科学教育会议，也曾经受邀担任过一些国家科学教育杂志的编委，我发

现国际科学教育领域在近半个世纪所发生的最大变化，是全面肯定非认知因素在科学教育中的重要价值。一个全面的、符合人的发展的科学教育，应该不局限在知识获取上，应该更多地对科学兴趣、科学态度、科学精神、科学方法进行开发。在这个意义上，我觉得这本书的翻译出版，也会对当前的学校教育起到积极作用。

在阅读这部书的同时，我还拿到了由日本作家柳田理科雄撰写的《空想科学》六卷。该书跟本书最有共通感的地方在于，两个作品都把奇幻文学和影视纳入到阐发的范围。过去一般认为，科幻文学的背后有一个科学的骨架，而奇幻文学只是魔法在后面支撑。但读过这两本书之后你会发现，奇幻文学和影视作品其实也是学习科学地观察世界的良好载体。

总结一下，作为一本科幻奇幻文学的拓展之书、类型文学作家的参考之书、创意爱好者的学习指南、科技宅人/极客的思考圣经，《巫师、外星人和星舰》在中国的引进和出版是科幻奇幻领域的一个有价值的大事。希望这部作品能带动更多国人的同类创作。

吴　岩

2015 年 5 月

吴岩，科幻作家，世界华人科幻协会会长，北京师范大学文学院教授，开设课程有面向本科生的《儿童文学专题(科幻文学)》及面向研究生的《中西科幻文学研究》。

# 目　录

# 第1章

# 游戏开始

亲爱的罗杰：

（某君）与我书信往来，已有一段时日。他是一位很特别的粉丝：喜欢作品中的科学，超过作品本身。在他看来，我应该少管情节和人物，专心描画科幻奇境。他是个行家里手，总能找到我作品中技术细节方面的漏洞，而且言无不尽。我喜欢他……

拉里·尼文①写给罗杰·泽拉兹尼②的信，1974年1月3日

## 1.1 创作本书的目的

我小时候，读过很多的科幻小说，那是20世纪70年代和80年代。当时我也读过很多其他东西，但科幻（还有奇幻）作品带来的满足，却是任何其他作品都无法取代的。我比较爱读“硬”科幻，也就是围绕真实科学理论展开情节的作品，其中可能涉及物理学、天文学、大型工程项目等。在这些故事里，星际旅行成了家常便饭，贫穷之类的问题几近消失，冲突总是围绕着极端重大的事件展开。在我看来，

---

① 拉里·尼文（Larry Niven，1938— ），生于美国加州。硬科幻大师，以“已知空间”系列闻名科幻界。系列中最著名的作品是《环形世界》。作品多次获得星云奖和雨果奖。——本书脚注均为译者注，原注可见于每章节最末。

② 罗杰·泽拉兹尼（Roger Zelazny，1937—1995），美国著名科幻奇幻大师，写作生涯中获得3次星云奖和6次雨果奖（14次提名）。代表作有《安珀志》系列和《光明王》等。

这样的故事总比肥皂剧更有吸引力，后者的主题，不过是“某甲不爱某乙”之类。

长大以后，读书的兴趣有所转移，但却始终忘不了早年读书时那份激动的心情。我现在之所以成了一名科学家，就是源于对那些科幻作品的兴趣。每当看到哈勃空间望远镜发回的照片，或是听到太阳系外行星探索的最新进展，我还是会莫名激动。如今，我还企盼着人类能在我的有生之年发现外星生命。我依然梦想能够去月球或者同步轨道卫星上度假。只是，在拥有这类梦想的同时，已经成年的我现在明白，科幻小说中的很多设想都是根本不可能实现的。这本书是写给十五岁时的我，以及其他像我当时一样的读者看的。那时的我们想要知道：科幻作品中的哪些成分来自现实中的科学，因而有着一定的真实性；哪些完全脱离现实，因而不可能实现。这本书，就是少年时的我会梦想得到的东西。就像与尼文通信的那位读者一样，我对科幻小说的兴趣，也集中在书中那些离奇的环境设定、外星人的生活，以及高度发达的科学技术方面。我一直都想知道，科幻小说中的设定，有哪些(可能会)是真的，哪些不是。在很大程度上，这也是我成为物理学家的原因。

几乎所有的科幻作品中，都包含错误的“科学”。这并不意味着那些故事不好或者不对。有些科幻作者，对作品中的科学细节严谨到近乎痴迷的程度，比如拉里·尼文，而多数人对此没有那么执着。不过，科幻小说家的入职门槛很高：任何科幻作者要想获得公认的成就，都需要真正理解基础物理、化学、生物、天文、历史(包括古代史和近现代史)、社会学以及军事战略等学科。此外，作品及其本人还必须有一种独特的气质与之相配，否则就只能被看作浪得虚名——不用说，他们肯定需要阅读大量书籍来充实自己。科幻作家通常并没有像职业科学家那样紧跟专业领域最新进展的条件。而科幻小说的创作过程中，又会涉及大量不同学科、不同门类的知识，远远超过职业科学家能够跟踪的范围。

这本书，就是一名物理学家所做的尝试，来讨论硬科幻小说创作中涉及的科学，尤其是数学和物理学。此外，我还点到为止地浏览了一下奇幻作品中相关的物理学问题：它们远比表面看起来复杂。这本书并没有试图预见未来。正如切斯特顿[①]所说：预言者最大的乐趣，就是看自己的前辈们出乖露丑。事实上，我的作品仅限于讨论创作中用到的科学。前人已有很多作品，从文学角度研究科幻小说，而我所有的论述，都仅限于科学视角。因此，我选择来讨论的作品，一半来自

① 吉尔伯特·基思·切斯特顿(Gilbert Keith Chesterton，1874—1936)，英国作家、文学评论者以及神学家。热爱推理小说，所创造最著名的角色是“布朗神父”，首开以犯罪心理学方式推理案情之先河。

于我个人的阅读经历，一半取决于本书的创作需求。我倾向于回避那些作品中缺少科学元素的作者，偶有提及，则是为了指出其作品中的谬误。我还倾向于将内容局限于文学领域，也就是各种篇幅的小说。尽管书中偶尔也会谈到科幻电影和电视节目。

有很多前人做过类似的工作，其中有科学家，也有科幻作家，还有几位身兼两职。科幻作家中最突出的，当数波尔·安德森[1]，我这本书就是献给他的。他写过两篇同类题材的文章，《造星指南》(*How to Build a Planet*)和《科幻中的失误与悖谬》(*On Thud and Blunder*)。我在十几岁的时候就读过这两篇文章。要不是受到他的感召，这本书根本就不会诞生。艾萨克·阿西莫夫[2]和阿瑟·克拉克[3]都写过很多关于科学的文章。拉里·尼文则在几篇文章中探讨了瞬间转移、时空穿梭和其他一些科幻主题。几乎是从现代社会肇始之初，科学家就在对科幻小说中的设想发表文章，我会在适当的场合引用相关内容。这本书主要是对前人论著的总结，原创性的观点并没有占据大部分篇幅。尽管我觉得自己的确也提供了一些全新的内容，比如第 3 章里，关于“哈利·波特”系列烛光照明问题的讨论等。

## 1.2 我的若干假设前提

大卫·戈罗德[4]曾写道：几乎所有的科幻作家，都不可避免地要在作品中包含一点违背已知科学理论的内容。他把这称为“大话点”(baloneyum)。他的建议是，初学写作的作者，每部作品中的“大话点”不要超过一个。有经验的作者，可以

---

① 波尔·安德森(Poul William Anderson，1926—2001)，美国科幻界元老级作家，黄金时代代表人物之一。曾 7 次获得雨果奖、3 次获得星云奖。安德森的小说大多是硬科幻，有着坚实的科学基础和较为深刻的思想内涵。重要作品包括《脑波》、《时间巡逻》、《敌对的群星》等。

② 艾萨克·阿西莫夫(Isaac Asimov，1920—1992)，出生于俄罗斯的美籍犹太人作家，公认的科幻大师，与儒勒·凡尔纳、H. G. 威尔斯并称为科幻历史上的三巨头，同时还与罗伯特·海因莱因、阿瑟·克拉克并列为 20 世纪三大科幻小说家。他创作力丰沛、产量惊人，一生创作和编辑过的书籍超过 500 册，作品以科幻小说和科普丛书最为人称道。作品中，以“基地系列”最著名，其他的主要著作还有“银河帝国三部曲”和“机器人系列”等。

③ 阿瑟·查理斯·克拉克爵士(Sir Arthur Charles Clarke，1917—2008)，英国作家，尤其以撰写科幻小说闻名。他与艾萨克·阿西莫夫、罗伯特·海因莱因并称为 20 世纪三大科幻小说家。克拉克也是一位高产作家，他最知名的科幻小说作品是《2001：太空漫游》；其他代表作包括《童年的终结》、《神的九十亿个名字》等。

④ 大卫·戈罗德(David Gerrold，1944—　)，生于芝加哥，美国科幻作家，曾担任《星际迷航》电视编剧。小说作品《火星的孩子》获得过星云奖和雨果奖。

放进两个。只有大师级的作者，才能应对一部作品包含三个“大话点”的情况[94]。我觉得这是一套很好的准则。

本书中，我也采取了类似的保守立场。在分析科幻作品时，我假设现有的物理学规律大部分都是对的。它们还不完整，我们并未了解全部自然规律。但是这种不完整性，并不会妨碍我们对大多数科幻作品的理解。尤其是牛顿运动定律，我假设它们足以描述比原子大的物体，我还假定爱因斯坦的相对论是正确的，而且量子力学是对微观世界运动的准确描述。我唯一准许自己保留的“大话点”，是承认超光速运动存在的可能性，并认可时空穿梭。从我们目前所知的物理学来看，两者能够实现的可能性都不大，但也不能完全断定为不可实现。

## 1.3 全书结构

本书共有四大部分，每一部分下面，又包含围绕同一主题展开的几章。具体如下。

**1. “哈利·波特物理学”**

第一部分考察了物理学在奇幻小说作品(及其系列)中运用或滥用的情况。我选择了两部“城市幻想”类型的作品系列作为讨论重点：一部是罗琳①的“哈利·波特”系列，另一部是吉姆·布彻②的“德雷斯顿档案”系列。这一部分面对的问题，跟全书其他部分不一样。奇幻作品，就其本质而言，就不可能完全遵循现实世界的科学逻辑。不过，我们至少可以评判，在一部作品内部，作者能否自圆其说；以及在面对麻瓜世界的时候，作品中使用的那些魔法还能否成立。

**2. “星际旅行”**

这是全书篇幅最长的一个部分，包括 9 章内容，因为这个话题的确有很多内容值得探讨。太空旅行，可以说是全部科幻作品中最为重要的题材，以至于在 20 世纪 30—80 年代，它几乎就是科幻的代名词。这一部分的目标之一，是在讲清楚星际旅行的科学含义之外，也阐明其背后的经济学因素。核心问题是：为什么黄

---

① J. K. 罗琳(J. K. Rowling，1965— )，本名乔安妮·凯瑟琳·罗琳，英国奇幻小说家，代表作为“哈利·波特”系列作品。该系列畅销全球，销量超过 4 亿本，成为史上最畅销的书籍之一。

② 吉姆·布彻(Jim Butcher，1971— )，美国畅销书作者，生于密苏里州。代表作《德雷斯顿档案》曾被改编为游戏和电视剧。

金时代[A]的科幻预言没有成真，星际旅行到现在都没有减价而且普及？

**3. “外星人和外星世界”**

这部分有4章，探讨科幻作品中的另外一大主题：太阳系内外存在外星生命的可能。

**4. “古戈年”**

这部分讨论在遥远的将来，人类（或其他智能生命形式）存续的可能性。我们将遵循科幻作家奥拉夫·斯塔普尔顿[1]和物理学家弗里曼·戴森[2]的思路来展开。

我对全书内容的取舍，以及章节设置的选择，都有很浓的个人色彩。这本书更像是一部结构松散的论文集，而不是整齐划一的长篇著作。我所写的，就是科幻和奇幻作品中我最感兴趣的那些话题。希望读者也会觉得有趣。我的重点是自己最为熟悉的那些作者，也就是英美国家的科幻作家。又因为我最了解的是黄金时代、新浪潮和赛博朋克早期作品，所以会让这本书显得有点古老，跟不上潮流。我尽可能对这些作品做了足够的说明，以免让本书的任何读者难以理解我谈及的科学论题。

我为打算采用这本书当作教材的教师准备了一套随堂作业题。为节省纸面空间，我们把这些作业题按照章节顺序整理好放在了网站上（英文网址：press.princeton.edu/titles/10070.html）。我还为这些题目准备了答案和解答提示。本书不能取代普通物理学教材，但可以作为专门课程教材使用。

## 1.4 你需要掌握的数学和物理学基础知识

我希望本书的读者能够看懂代数方程式，而且能在一定程度上理解其含义。我想让这本书成为科幻和奇幻爱好者的思维练习手册。只要求读者懂得初等代数，又明白微积分是怎么回事就行。

我在书中列出的等式，并不是拍脑袋发明的。它们大多都是物理学定律，反映了物理量之间的数值关系。与纯数学意义上的等式不同，它们与现实世界之间

---

① 奥拉夫·斯塔普尔顿（Olaf Stapledon，1886—1950），英国哲学家、科幻作家。作品以诗一样优美的语言和极具震撼力的宏大视野著称。主要作品有《造星主》、《最初的人和最后的人》等。

② 弗里曼·戴森（Freeman Dyson，1923— ），美籍英裔数学物理学家，普林斯顿高等研究院教授。在科幻界最广为人知的创意是戴森球。

存在着对应关系，或者至少是表达了科幻小说中世界的规律。多数情况下，我都会详细讲述等式的具体含义，但不会从最基础的原理出发来推导它们。这与大多数物理学课堂上的情况完全不同：那种情境下，公式的推导过程与实际应用都很重要。因为我的大多数读者都不会是物理学家，我会详细解释这些等式的简单应用，以及它们为什么能够成立。我还希望读者对微积分的概念有一点初步的了解。全书仅有几处用到微积分，所以这部分知识并非不可或缺。不过，如果我说起“导数”、“积分”等概念，听懂了总会有些帮助。

物理学是本书科学体系的核心。书尾的附录简单阐释了牛顿运动定律，这是理解任何物理学体系的必要基础。就像要掌握读写能力，就需要先学习拼写和语法一样。牛顿运动定律可以描述宏观世界物质的运动方式，也就是说，它适用于比原子大的物体。但是，这个体系只能近似地反映现实。量子力学才能真正反映事物的本相。在物理学的世界里，事物背后隐藏的规律往往难以一目了然。至于说这到底是为什么，牛顿运动定律又为什么只能近似地反映现实世界的基本规律，这些问题已经超出了本书能够容纳的范围。如果读者有兴趣做更进一步的了解，可以找到几十本优秀的教材，都能够回答此类疑问。我个人强烈推荐理查德·费曼先生的两本书：《物理学定律漫谈》和《费曼物理学教程》，尤其是第二本书的第二十章[81,85]。

## 1.5 能量与功率

能量与功率这两个概念，是理解本书全部内容的关键。其中，功率衡量的是一种形式的能量转化为另一种形式的能量的快慢程度。能量是个非常有用的概念，因为它守恒：它可以从一种形式转化为另一种形式，既不会凭空产生，也不会凭空消失。在本书的几乎所有章节，我都会用到能量守恒定律，有时明确指出，有时暗含在论述里。常见的几种能量存在形式如下。

- 因万有引力产生的势能：即一对物体因互相吸引而具备的能量。在涉及星际旅行的任何讨论中，这一概念都非常重要。
- 化学能：即分子内部因空间结构和化学键形态而具备的能量。化学反应会导致这些属性发生变化，通常也会带来化学能的改变。在放热反应中，反应后的化学能低于反应之前。能量在反应过程中通常是以热能的形式被释放；吸热反应与此恰恰相反，必须从外界获取能量，反应才能进行。

- 核能：即来自原子核结构和组成方式的能量。原子核由质子和中子组成。原子核中的变化也像化学反应一样，可能吸收或者释放热量。只不过，核反应吸热和放热的规模，比普通化学反应大一百万倍左右。
- 质量：物体的质量，也可以看作能量存在的一种形式。爱因斯坦提出过一个著名的质能方程式，来描述质量与能量互相转化的数量关系

  $$E = Mc^2$$

  其中的 $E$ 代表质量为 $M$ 的物体中蕴涵的能量，而 $c$ 是一个常量，表示光在真空中的速度。这个公式反映了任何形式的一定质量的物体所含有的最大能量值。
- 动能：即来自运动的能量。牛顿的动能计算公式为

  $$K = \frac{1}{2}Mv^2$$

  其中 $K$ 代表动能，$M$ 是运动物体的质量，$v$ 是它的速度。这个公式没有计入相对论带来的影响，但对速度小于光速 10%的物体而言，已经足够精确了。物体减速，则动能减少，能量必须转化为其他形式。物体加速，则需要将其他形式的能量转化为动能。
- 热能：热能来自物体中原子或分子的随机运动。以室温下的气体为例，其热能就是所有气体分子各向移动的动能之和，加上它们围绕中心旋转产生的能量。对液体和固体而言，热能分析的内容要更加复杂，本书对此不会详细讲述。
- 辐射：或者也可以称为光能。光是能量与力的复合体。尽管在大多数情况下，其中的力都微弱到难以测量。多数的光都在肉眼可见范围之外，因为它们的波长是人眼无法感知的。

本书最常用的计量单位中，表示能量的单位是焦耳(J)。焦耳是公制热量单位。如果你想对它有个直观印象，可以找一升瓶装水，将它举高 10cm(约 4in①)，你就刚刚让这瓶水的势能增加了 1J。[B] 我也使用了一些其他单位，比如衡量食物中能量的卡路里，或者千卡，就在几章里出现过。1kcal 表示将 1kg 水的温度提高 1℃所需的能量，等于 4190J。如果其他章节用到另外的计量单位，都会在出现时给出定义。

功率衡量的是一种形式的能量转化为另一种形式的能量的速度。功率的基

① 1in＝2.54cm。

本单位是瓦特(W)。1W 就相当于每秒钟将 1J 的能量转化为另一种形式的能量。比如说，假设你有一枚功率 60W 的灯泡，那么在每一秒钟，都有 60J 的能量发生转化。流过钨丝的电子的动能，被转化成为辐射能(或者称为光)。

不同形式的能量及其互相转化的关系，是你阅读本书过程中需要了解的首要问题。好了，我们只需要这一点点说明，游戏就可以开始了。

**注：**

A. 科幻读者和评论家把 20 世纪的科幻小说细分成不同的子文类。在年代上，整体呈现前后相续的态势。比如通常所说的“黄金时代”，涵盖“二战”结束到 60 年代中期这段时间。那时候，罗伯特·海因莱因、艾萨克·阿西莫夫、阿瑟·克拉克等几位作者正如日中天。这一时期科幻作品的题材，通常是星际旅行和外星接触。我还会提到 20 世纪 60 年代和 70 年代的“新浪潮”时期的作者，比如布莱恩·奥尔迪斯；以及 20 世纪 80 年代后兴起的赛博朋克文学。当然，也有一些作者难以简单归类，比如菲利普·K. 迪克。我对奇幻作品也做了类似分类，将其分为“剑与魔法”、“魔幻现实主义”、“城市幻想小说”等。对本书而言，城市幻想小说特别值得留意，因为便于拿幻想世界跟遵循科学规律的现实世界进行对比。

B. 更确切地讲，你增加的是一对物体之间的势能，这对物体分别是地球和你的瓶装水。任何一焦的势能，对应的永远都是一个引力系统，其中必须有两个及以上的物体，而不能仅有一个。然而，由于地球的质量比瓶装水大太多，在我们的简单实验中，它可以被看作是静止的。我们讨论势能的时候，常常只提到系统中较轻的物体，就好像是它本身的势能发生了改变一样。通常只有在这对物体质量接近的时候，强调势能对应于系统整体才有意义。

# 第一部分

# 波特物理学

# 第 2 章

# 哈利·波特与守恒律

## 2.1 奇幻小说的分类

“奇幻小说中的物理学”,看起来是个自相矛盾的伪命题。奇幻小说之所以称为奇幻,就是因为它摒弃科学,而选择魔法。尽管如此,却有不少奇幻小说作者借鉴科幻作者的态度,给自己的幻想世界设定前后一贯的运行规则。究其原因,就是因为有很多奇幻小说作者,本身也创作科幻。几乎毫无例外的现象就是:那些贴近现实的科幻作者写奇幻作品,也同样富有现实依据,具备前后一贯的规则。而对科幻作品严谨性不甚留意的作者,也不会为他们的奇幻世界设定规则。

前一类奇幻作家中的代表人物是厄休拉·勒古恩[1]。她的《地海传奇》三部曲[2]中,有关于“真名法则”的详细说明,这套规则是地海世界一切魔法的基础。她的书中还有几篇由魔法师讲授的课程,详细阐述了使用魔法的方方面面。很多作者对她这套规则都非常认可,以至于把同样的体系照搬进自己的作品中。另外有些作者,把过时的科学或哲学观点用作他们魔法世界的理论基础,就像罗伯特·海因莱因[3]

---

① 厄休拉·勒古恩(Ursula Kroeber Le Guin,1929— ),美国科幻奇幻作家。著有小说 20 余部,所获文学奖与荣誉不计其数。科幻代表作有《一无所有》和《黑暗的左手》,奇幻代表作为《地海传奇》系列。她的作品语言非常优美,逻辑严密且富有思想深度。

② 原文如此。实际上《地海传奇》系列已经有了四部长篇和两部短篇集。

③ 罗伯特·海因莱因(Robert A. Heinlein,1907—1988),美国科幻小说作家,被人称为科幻先生(Mr. SF)。与艾萨克·阿西莫夫和阿瑟·克拉克被称为 20 世纪科幻小说三巨头。代表作有《异乡异客》、《星船伞兵》、《严厉的月亮》等。

在短篇作品《魔法公司》中所做的那样。这本书中的魔法师运用"类似法则"之类的理论来获得魔力。兰道尔·加雷特[①]在他的《达西爵士》系列小说中，构造了一个魔法高度发达，而科学未能起步的世界。其基础还是前述理论，作者给出了很多细节，解释魔法作用的原理，以及在侦破案件过程中的应用。

备受欢迎的罗琳在她的"哈利·波特"系列中，就没有试图让她的魔法遵循任何已知的科学法则。请不要误会我的意思：我喜欢她的作品，只是觉得她在魔法系统的一贯性方面比较失败。所以我才把这个部分称为"波特物理学"：在整个"哈利·波特"系列中有无数个例子，魔法的使用完全违背物理学规律，甚至还自相矛盾。罗琳完全属于上面所说的第二类作者。

魔法世界当然没有必要遵循科学法则——甚至还不能这样做，那样就成了科幻，而不是奇幻作品了。很多逻辑严谨的奇幻作者选择保留的，往往是最根本的物理学法则，也就是几大守恒定律(质量守恒、能量守恒、动量守恒)和热力学第二定律。

## 2.2 变形魔法与质量守恒

*哈利回头看时，却见穆迪教授正一瘸一拐地走下大理石阶梯。他已经取出魔杖，魔杖直指一只纯白的雪貂。后者趴在大理石地面上瑟瑟发抖，就在刚才马尔福所在的位置。*

——J. K. 罗琳 《哈利·波特与火焰杯》

哈利·波特世界里的变形魔法，是个容易引发争议的问题。自从 19 世纪以来，科学界公认的基本观念之一就是质量守恒：即封闭系统的总质量不变。在把德拉科·马尔福变成雪貂的过程中，穆迪教授是怎么处理他冗余部分质量的呢？如果我们假设，15 岁的马尔福质量约为 60kg；而一只小雪貂的质量为 2kg，那么多余的 58kg 在哪儿呢？多数奇幻作者在处理变形魔法的时候，都要面临这一问题。在《天鹅湖》的故事中，当奥杰塔公主被邪恶魔法师罗特巴特变成天鹅时，她身体多余的质量又在哪儿？人们的确可以想象一种怪异的生物变异过程，可以把一种

① 兰道尔·加雷特(Randall Garrett，1927—1987)，高产的美国科幻与奇幻作家。在 20 世纪 50 年代至 60 年代，曾是《惊奇故事》等科幻杂志的长期撰稿人。《达西爵士》系列是他的代表作。

生物变成另外一种，可是多出的质量该怎么办？

有几位奇幻作者选择直面这一问题。在波尔·安德森的小说《混沌行动》中，故事的主角是一位狼人。他曾明确说，自己在两种不同身体状态下的体重是完全一样的。这对狼人来讲，大致还能说得过去。因为成年的狼，体重的确接近于非常轻的成年男子。但是当主角后来遇见“虎人”的时候，问题就出来了。在他长成人样的时候，必须得保持高达400lb① 的体重，这样子变成老虎，依然显得非常袖珍。显然，这个方案会导致虎人健康问题以及巨大的心理压力。在尼文的短篇《为何好人不威猛》中，主角也含蓄地暗示了质量守恒定律。他说，作为人类，自己还不算胖，但作为狼人，他已经大腹便便、有如怀胎十年！

多数奇幻作者都不会为此担心，其原因可能是：假如过分在意质量守恒，势必给很多奇幻情节带来过于沉重的负担。比如说，当美女魔法师被手持利刃的野蛮人围困时，尊重质量守恒的作者就无法让她变成一只美丽的白鸽翩然飞走。要变的话，也只能变成一只鸵鸟，当胸踹对手几脚。(实际上，我觉得这也是很精彩的故事。)一定要想清楚质量去哪儿了，肯定会让你头痛。爱因斯坦曾告诉我们说，质量可以兑换为能量，“定价”是 $9\times10^{16}$ J/kg。如果鬼使神差，变形魔法中丢失的质量全都转化成了能量，那么只要有一点小出入，就会导致一场大爆炸。(广岛原子弹爆炸的威力，仅仅与1g物质转化所兑换的能量相当。)每当麦格教授从人变成猫，她释放出的能量都相当于有史以来全部核试验释放出的能量的总和，而且是瞬间完成。还有，等她恢复成人样的时候，缺少的质量又从哪里来呢？

对这个问题，貌似找不到什么理想的答案。如果质量没能守恒，那也许就是在变形过程中偷偷溜走了，或者存入了另一维度的空间之类。总之很麻烦。如果转变过程中还牵扯到不同元素之间的转换，就会带来更多问题：不是做不到，只是非常麻烦。考虑一下美杜莎小姐的难题，她要把人类变成石头。人类的主要成分是碳水化合物，而石头的主要成分却是硅。碳的元素序数是6，相对原子质量是12，由6个质子、6个电子和6个中子组成1个碳原子。而硅的原子序数是14，相对原子质量是28，由14个质子、14个电子和14个中子组成1个硅原子。你无法随心所欲把一种元素变成另外一种。要把生物体中的碳变成硅，你必须设法提供缺少的粒子。或许美杜莎用高能粒子轰击受害者，以促使其体内原子结构改变？可是，如果她有这么高杀伤力的手段，还费劲把人变成石头干嘛？

---

① 1lb=0.453 592 4kg。

## 2.3 幻影移形和动量守恒

莫里斯瞪大了眼睛。"你会瞬间转移?"

"要是坐在高速行驶的汽车里就不行。"我当时回想起来还觉得后怕。"会没命的。我离开汽车后,还会保持坐在车里的速度。"

——拉里·尼文 《第四种职业》

在"哈利·波特"小说中,常常有人使用幻影移形。这是一种在某地瞬间消失,然后马上出现在另外一地的能力。在其他作品中,这种方法通常叫做瞬间转移。在《星际迷航》系列中,有"转移室"可以达到同样的目的。跟变形魔法一样,瞬间转移手段也会饱受能量守恒定律的困扰。当哈利·波特幻影移形时,他本人是否被转化成了某种形式的能量,以光速到达特定目的地,然后又被转化回原形了呢?如果是这样,需要处理的能量未免多过了头:幻影移形 1kg 的物质,我们就需要处理 $9\times10^{16}$J 的能量。哪怕仅有 1%的能量未能妥善处理,就会有氢弹爆炸那么大的威力。我们还将面对上一节谈到过的那些老问题:把 80kg 左右的物质转化为纯能量,会冒犯各种守恒定律。熵未免过大,还疑似谋杀——假如你愿意这么看问题的话。人体是一个非常复杂的系统,如果把它转化成纯能量,至少在我看来,你的确是把人杀掉了。先把人干掉,然后换个地方把他(她)重新组装起来,听起来一点儿也不靠谱。

出发前把人撕烂,到站再组装的方式既然这么麻烦,不如再看看另一条出路。作者们试图让瞬间转移成立的另一种解释,牵扯到一些量子力学概念。拉里·尼文在文章《论瞬间转移的理论与实践》[178]中写到过:量子力学中的"隧穿"现象,跟瞬间转移有些相似之处——电子之类的微粒,能够从障碍物的一侧到达另外一侧,而无须经过两地之间的空间。没错,电子的确有这本事,人应该也能做到吧?

在深入挖掘这一观点之前,我需要先召唤一下著名的海森堡不确定性原理①。迄今为止我们谈到过的都是经典物理学:我们假设,所有的物体都有明确的运行轨迹。实质上,我们是假设自己在任何时候都确切了解物体的位置和运动路线。

① 量子力学里的不确定性原理表明,粒子的位置与动量不可同时被确定。根据海森堡的表述,测量动作本身不可避免地会搅扰被测量粒子的运动状态,因此产生不确定性。

而这一假设并不合乎事实。有一条很基本的物理学定律告诉我们

$$(\Delta x)(\Delta p) \geqslant h/4\pi \tag{2.1}$$

这里的 $\Delta x$，是物体位置的不确定性范围，$\Delta p$ 是其动能（$=Mv$）的不确定性范围，$h$ 是普朗克常数，公制单位数值为 $6.626\times10^{-34}$ J·s。这个不等式的含义是，在测量任意物体的位置与速度时，我们都不能随心所欲提高精确度。因为我们读到的数字，实际上是一个乘积，如果将其中一个数字的不确定性减小，同时就等于让另一个数字的不确定性增大。不幸的是，$h$ 是个很小的常数。这就是多数情况下，量子力学带来影响都只对原子或比原子更小的微粒才有意义的原因。不过，的确存在一些有趣的意外。

过去一个世纪以来，科学家们完成过一些实验，可以说明量子力学对宏观世界的影响。其中两个较为古老的量子力学现象范例，就是超导现象和超流体现象。在低温环境下，液态氦中的原子显示的某些性质，让它们更像是单一原子，而失去了氦本身的个性。这种超流体状态的特点是电子的运动毫无阻力。液态氦能从容器里“爬”出来，还会出现奇特的量子力学旋涡。不幸的是，要让这种超流体现象出现，就需要把温度降低到 2K 以下。

超导是与之类似的低温现象：温度在绝对零度以上几度的金属，电阻突然下降为零。这种现象或多或少是因为金属中的电子进入了超流体状态。20 世纪 80 年代早期，科学家发现了几种在较高温度下能够达到超导状态的物质。但是，这里的“较高”是个相对的概念，约为 77K，大致是氮气变成液态的温度，仍要比室温低 200℃左右。

1995 年，科罗拉多大学巨石城分校的卡尔·维曼和埃里克·康奈尔带领的研究小组，率先在铷原子中创造出了玻色—爱因斯坦冷凝物。玻色—爱因斯坦冷凝物(BEC)是指一组被冷却的原子，由于其温度降低，导致量子力学不确定性加大到了原子间完全无法区分的地步。（超流体状态的氦，在很多方面与 BEC 相似，但要复杂得多。）为了实现这种状态，研究小组的科学家们运用激光等多种手段，实现了仅比绝对零度高不到两千亿分之一度的低温。

在 BEC 原子组内部，原子的位置在数百微米范围内完全无法确定。这个距离，大约与人头发的直径相当。这个范围听起来不算大，但对比起来已经很了不起了。每个原子的直径大约只有 1Å[①]，是发丝的百万分之一。这已经是个不错的起点。有一种效果被称作“量子隐形传态”，就是将一个量子力学系统的信息传送

---

① 1Å$=10^{-10}$m。

给另外一个量子系统。迄今为止，还只能一次处理几颗原子。正如网络漫画 *xkcd*① 中所言：这算不上真正的瞬间转移[172]。另一个不幸的消息是，量子力学中还有一条"禁止克隆"定理，它证明了一个量子力学系统不可能被完美地复制[255]。

这些研究成果的共同之处是，它们都需要非常低的温度。近年来，物理学家们已经能够把宏观对象"降温"到足够低，以便让量子力学原理的影响显现。（我给"降温"加上双引号，是因为他们现在使用的技术，完全不同于传统的低温实验法和惯常的降温技术。）这离物体的瞬间转移还有很远的距离，但已经上路。最主要的实际范例是激光干涉仪重力波观测站（LIGO）所使用的镜面，这是用来探测如相撞的黑洞等产生的引力波的仪器。LIGO 镜面通过激光和电子机械设备降温，以便让它的运动仅有量子力学意义上的不确定性。这是因为，它们的用途是探测引力波，这种信号极度微弱，即便是在两个黑洞相撞时，镜面所移动的幅度也不到原子核大小的百万分之一。

如果我们能找到办法，把公式中的常量 $h$ 加大，就有望开发出真实可用的瞬间转移机。不幸的是，这个设想也会面临两大困难：首先，$h$ 是自然界客观存在的基本常量，没有人知道它的数值怎样才会改变，更不知道这到底能否实现；其二，就算我们能改变 $h$ 的值，只要稍加改动，就会令整个化学反应系统面目全非。如果 $h$ 的值被改变了 1%～2%，很有可能就会导致全部生物灭绝。

在有限范围内改变普朗克常量的设想，曾经出现在蒂姆·鲍尔斯②的几部城市幻想小说中。最值得一提的是《最后呼叫》和《惊涛怪浪》，尽管它们出名的原因并不是瞬间转移[195-196]。在上述第二本书中，有一段发生在不老泉边的灵异情节。书中的大反派赫伍德博士说，此地的"不确定性"分布不均：地面上一点儿都没有，空气中却充斥着巨大的量子不确定，以至于里面出现了一个模糊的身影，能够回答人的问题。鲍尔斯这位作者，特别喜欢在奇幻设定中夹杂一些似是而非的科学，这种独特的文字游戏，让他的作品有一份独一无二的惊悚味道。

瞬间转移当然是很富有奇幻特质的设定，因为除了靠魔法，我想不出任何传送大件物品的可能。它违背了太多的物理学定律。

如果我们假设，瞬间转移真的可以实现，那么，现有的物理学定律又会对它造

① *xkcd* 是由兰德尔·蒙儒（Randall Munroe）所绘制的网络漫画，作者给作品的定义是一部"关于浪漫、讽刺、数学和语言的网络漫画"。

② 蒂姆·鲍尔斯（Tim Powers，1952— ），美国作家，尝试过科幻小说创作，但后来几乎都在创作"秘史"类型的作品。鲍尔斯擅长发掘看似平凡无奇的历史事件，糅合神话、传说与文学典故，并重新赋予读者原本熟悉的世界全新的风貌。

成何种影响呢？拉里·尼文是第一位讨论动量守恒对瞬间转移影响的作家。本节开头部分的引文就展示了这一点。假设您正坐在一辆行驶着的汽车里，再假设您是生活在“哈利·波特”书中伦敦城的魔法师，而且已经通过了幻影移形考试。当时你正在高速路上以 60mile[①]/h 的速度行驶，然后看到一位朋友站在路边，于是你幻影移形到她身旁。根据爱因斯坦的想法，一切参考系生来都是平等的。所以，物理原则约束下的你，此刻继续保持着相对于女孩和地面 60mile/h 的速度。小心！根据类似的原理，使用《星际迷航》中的转移机“光降”到行星表面，后果也会很严重。

我们假设“企业号”或其后继者正在地球同步轨道上飞行，以便让它始终悬停在地球赤道某地上空。你可能会以为，此时的“企业号”与地球上的这个点保持同样的运行速度，但事实并非如此。地球每 24 小时围绕地轴旋转一周，所以，星舰也需要在相同时间内围绕地球表面旋转一周。但是在同样的时间里，它转的圆圈半径更大，所以线速度一定更快。因为同步轨道的高度是 42 000km，所以它移动的线速度是地球的 42 000/6400≈6.6 倍，这是地球同步轨道的高度与地球半径之比。因为地球表面物体的运动速度大约是 1000mile/h，任何“传送”至地球表面的人，都将带有 6600－1000＝5600mile/h 的相对速度。这可能带来大麻烦。拉里·尼文创作过一些非常优秀的短篇小说，收在作品集《空间洞穴》中，其中就涉及了瞬间传输及其科学和社会影响的话题。在这些短篇小说，以及文章《论瞬间转移的理论与实践》中，作者讨论了很多问题：比如向着山下传输的物体，温度是否会升高？转移到不同纬度地区时动量守恒的问题，如此等等。我们的在线练习题中会更多涉及这一话题，网址是 press.princeton.edu/titles/10070.html。

顺便提一句，“星际迷航”系列中对转移机的使用，自相矛盾之处很多。拉里·尼文的《无尽路途》和阿尔弗雷德·贝斯特[②]的《群星，我的归宿》中都指出瞬间转移机可以是非常理想的武器[178,38]，“星际迷航”系列中的转移机就是证据。有了它，你可以随意在任何地方安放炸弹，可以随意绑架任何人。有一集中的转移机出现故障，一下子把皮卡德变成了十岁小孩。想想推论吧！如果这样的故障能多次重复，你就相当于发现了不老泉。或者再更改一些其他设定，你就能治愈任何疾病或伤痛。然而在“星际迷航”系列中，这些推论都没有任何人想过。

---

① 1mile＝1.609km。

② 阿尔弗雷德·贝斯特(Alfred Bester，1913—1987)，美国科幻大师，世界科幻大奖“雨果奖”第一届得主。曾加入 DC 动画公司，参与了“超人”和“蝙蝠侠”两大超级动画英雄的创作。

## 2.4 修复咒和热力学第二定律

“要我帮忙收拾一下吗?”邓布利多有礼貌地问道。

“请吧。”主人回答。

于是他们背对背站在房子中间,一名高瘦的魔法师和一个矮胖的同行,用整齐划一的动作挥动起魔杖。

家具纷纷飞回原来的位置:装饰品在空中恢复原样,羽毛嗖嗖地飞回靠垫,撕碎的书籍在半空中修复,降落在书架上……裂痕、碎片和孔洞纷纷消失,连墙面也自动擦拭得一干二净。

——J. K. 罗琳 《哈利·波特与混血王子》[197,64-65 页]

吉姆·布彻的“德雷斯顿档案”系列①有一段情节,当时哈利·德雷斯顿和他的朋友一道,被一个巨人一样硕大的稻草人追赶着逃过芝加哥的街道[45]。当时刚刚下过雨,哈利需要炸掉某些挡在前面的障碍物。于是他从巨人将要踏入的水洼里吸取了能量,再用这些能量发动火球魔法,轰掉挡路的那些障碍物。巨人在冰面上滑倒,障碍物被击碎,皆大欢喜。不爽的只有那位巨人,以及绝大多数物理学家。

哈利刚才的行为,触犯了物理学体系中最基本的原理之一——热力学第二定律。热力学第二定律的内容可以表述为:

要使热量从低温物体流向高温物体,你就必须做功②。

从书中情节来看,哈利显然没有做什么“功”,就已经让能量向它不情愿的方向流动了。哈利违背了“任何热反应过程中,整个世界的熵都必须增加”这条定律。

### 熵变化

熵是物理学中一个非常重要而又难解的概念。我的大多数读者可能都已经知道,“熵”是整个世界无序性的度量单位。它的晦涩之处在于:你很难明确定义何为有序,何为无序。通俗来讲,可以说世界的有序状态,是比无序更不可能出现

① 图书似乎还没有中文版。同名美剧的名字,也被译作《行走阴阳界》、《德雷斯顿谜案》、《灵异档案》等。

② 此处原文有误,这里采用了(修正后的)直译。

的一种情况。举个例子，假设你是一名大学生，你刚刚收拾完宿舍，所以你的书在书架上，床单在床上，白纸在桌子抽屉里，啤酒在冰箱里。这就是有序状态，因为它难得一见。玩笑至此为止。现在我们可以想象一下，如果把房间里所有的东西都拿来——有课本、啤酒瓶、床单之类，然后掷骰子决定把它们放在哪儿。比如掷出数字 1，就把对应的东西放进冰箱里；2 就放在床上；3 就放在书架上，如此等等。这样做的话，我们可能会发现床单放在了书架上，啤酒堆在床上，书却进了冰箱里。有序状态之所以称为有序，就是因为它在概率意义上很难出现。如果完全依靠掷骰子决定物品的位置，所有东西都乱七八糟的可能性更大。

不幸的是，要从有序与概率的概念出发，讲到热力和温度，还要经过漫长艰险的旅途。这是可以实现的，但超出了本书的覆盖范围。我们只需要指出，如果我们有一个热力学系统，其绝对温度是 $T$，如果对其增加数值为 $Q$ 的热量，那么系统熵的变化为：

$$\Delta S=\frac{Q}{T} \tag{2.2}$$

如果我们抽走同样数量的热量，熵也会减少同样的规模。没有任何力量会阻止热力学系统特定部分的熵减少，但热力学第二定律告诉我们，其他某处的熵必须增加至少相同的量。

热量自动从高温物体流向低温物体的原因，跟上述公式的分母部分有关。因为我们要除以 $T$，所以在为低温物体增加热量时，熵的增加幅度更大。所以，与低温个体接触的物体，将会“想要”将热量传给对方。是的，它本身的熵的确是减少的，但是温度较低的物体熵增加幅度更大。整个世界的熵因此增加。如果像“德雷斯顿档案”系列里面写的，出现了相反的情形，熵的总量就会下降。现在，让我们代入些数字来看看。

哈利吸取了足以让一大片水洼结冰的能量。让我们来假设水洼质量为 100kg。简单起见，我会假设其中的水温已经是 0℃(273K)，小说中的背景是隆冬时节的芝加哥，这个假设问题不大。水已经是可以结冰的温度，只是目前还处于液态。我们现在需要做到的，就是在温度不变的情况下抽取能量使它结冰。水的熔化潜热是 $3.34\times10^5$ J/kg。也就是让每千克处于结冰温度的水真正结冰需要从中提取的热量数值。算起来，德雷斯顿需要从水中抽取 $3.34\times10^7$ J 热量，才能使 100kg 的水结冰，水洼的熵减少了

$$\Delta S_1=3.34\times10^7/273=1.23\times10^5\text{J/K}$$

这些能量被灌进了火球里。所有雷·布拉德伯里[①]的粉丝都知道，纸的燃点是 451°F，或 232℃、505K。熵的增量为：

$$\Delta S_2 = 3.34 \times 10^7 / 505 = 6.6 \times 10^4 \mathrm{J/K}$$

这个数字小于水洼失去的热量数额。也就是说，在其他因素都没有变的条件下，整个世界的熵减少了两数之间的差额，即 $5.66 \times 10^4$ J/kg。

这个问题有办法解决吗？睿智的读者可能已经在反问：如果整个世界的熵必须要增加，那么冰箱又是怎样工作的？答案是：冰箱要通过种种形式做功，以弥补制冷带来的差额。这里的哈利自己就得完成冷冻设备的任务。哈利必须向火球做功，以弥补能量差额。根据我的计算，哈利至少需要输出 $2.8 \times 10^7$J 能量，以完成书中的情节。这个数字，大致相当于他 3 天内从食物中获取的能量总和。

邓布利多和斯拉霍恩使用的修复咒，带来的问题也不小。这个咒语减少了可见视野中的无序现象。人们容易看出，与"德雷斯顿档案"系列中的上述情节相比，无序现象明显减少了，但熵减少的具体数目，反而更难计算。我们可以给出一个非常粗略的估计：假设房间里的任何一件东西，我们都有固定数目的位置可以摆放，例如有 1000 种选择。那么，我们继续简单地假设，房间地板可以分成 1000 份，我们可以把所有物品随机放入。（你觉得 1000 份不够多？没关系，你可以随便划分成自己喜欢的份数，对计算结果影响不太大。）

然后我们假设有 100 件物品需要分配到各处：包括几本书、烛台上的玻璃碎片、水笔、家具，等等。我们取一件物品，把他放入随机位置，共有 1000 种不同选择。我们同样处理第二件，还是有 1000 种选择。计算过程中，我假定每个位置能够容纳超过一件物品。这样算来，分配两种物品就已经有一百万种不同方案！如果 $N$ 是我们需要处理的物品数量，而 $M$ 是每种物品能够选择的位置数量，那么所有物品的全部分配方案共有 $\Omega$ 个。其中，

$$\Omega = M^N \tag{2.3}$$

因此，随机摆放整个房间所有物品的方案，就将有 $1000^{100} = 10^{300}$ 个，而其中仅有一种正确。如果我们一秒钟能够处理完一种所有物品的随机摆放位置，那么平均就要花费 $10^{300}$ 秒，约等于 $10^{292}$ 年，才能把所有物品放回正确的位置。这已经大大超过了整个宇宙已经历的时间长度，也超过了所有恒星剩余的寿命。

---

① 雷·布拉德伯里(Ray Bradbury，1920—2012)，是美国科幻、奇幻、恐怖小说作家。代表作有《华氏451》、《火星纪事》等。

如果更进一步挖掘下去，你可以得出此过程中的熵变化：

$$S=k\ln\Omega=kN\ln M \tag{2.4}$$

此处的 $k=1.38\times10^{-23}$ J/K。计算过程中用到了对数计算公式 $\ln M^N=N\ln M$。

$$S=kN\ln M=9.5\times10^{-21}\text{ J/K}$$

这里的熵变，与哈利·德雷斯顿打怪兽时候遭遇的相比，规模要小很多。变化较小的原因，是此事牵扯到的物品数量少。我们仅仅需要将100件物品放回原位。换言之，邓布利多和斯拉霍恩只需要花费几小时，就可以搞清楚每件物品的正确位置，从而整理好房间。在哈利·德雷斯顿的遭遇战中，他需要整理数百摩尔的各类分子，头绪要复杂得多。

在修复咒的问题上，罗琳忽视了很多衍生推论。它能否用来治愈创伤？能否让人返老还童？说到底，熵的增加与时间的流逝紧密相关。我们之所以能够区分过去和未来，就是因为我们朝向熵增加的方向观望世界。在罗琳的世界里，时空穿越是有可能实现的。那么修复咒是否可以看作是通过某种时空倒流来实现的呢？

在本章最后，我想回顾一下开头提出的话题，也就是每位作者对魔法作用机制的不同态度。表面看来，"德雷斯顿档案"系列只是"哈利·波特"系列的暗黑版本。除了主角的名字都叫做哈利之外，两书还有如下一些相似之处：

- 故事的背景都是现代社会，魔法世界与世俗世界并存；
- 两个系列故事中，魔法世界都隐藏在"麻瓜世界"视野范围之外；
- 两者都有铁腕统治的"政府"，"德雷斯顿档案"系列中的"圣白议会"，和"哈利·波特"系列中的"魔法部"。两个政府机构对臣民的人权都不当回事；
- 两部小说都围绕推翻上述政府的阴谋展开；
- 两部小说都以伪拉丁文作为施咒语。

但是，在确保自己笔下的魔法世界逻辑一致性方面，吉姆·布彻却比罗琳付出了更多的努力。正如上文所说，修复咒涉及的熵减少幅度，小于"德雷斯顿档案"系列中的魔法，因而在物理学意义上更为准确。但对我而言，却感觉"德雷斯顿档案"系列中的魔法比邓布利多的修复咒更为可信。这是因为吉姆·布彻确立了前后一贯的规则，来约束整部书中的魔法使用。在系列的其他作品中，哈利·德雷斯顿曾说：他所佩戴的戒指和项链，平时都从他走路的动作中窃取一部分能量。如果其中的能量在一次战斗中被释放，就需要重新补充。如果哈利·德雷斯顿频繁使用魔法，就会变得疲惫不堪，这种情形，在罗琳的世界里似乎从未出现。"德雷斯顿档案"系列中的情节，更多地受到一些规则的约束，也会因魔法的局限

性受到影响。

罗琳的作品则不遵循类似的原则。尽管早在第一分册《哈利·波特与魔法石》中，哈利就已经听说魔法并不是挥舞法杖、念诵咒语那么简单。但直到全书结尾，写到的也无非是上述这些入门级动作。魔法的难易，似乎也并不存在清晰的界定法则。最明显的事例出现在第三分册，魔法部把一部时间机器交给一名十三岁小女孩，目的居然仅仅是为了让她多选几门课。与之形成鲜明对比的是，在《德雷斯顿档案》系列中，回到过去的时间穿梭被定为重罪。在《哈利·波特与死亡圣器》中，突然又冒出一条规则说，任何人都不得使用魔法将其他物品变为食物。这很可能是情节需要，为了迫使躲在霍格沃茨的学生们与外界保持联系（也就是猪头酒吧）[206]。我再强调一次，我喜欢"哈利·波特"系列小说，但我体内潜藏的完美主义者，却对作者缺乏魔法使用通行规则的做法很不满意。仿照波尔·安德森的名言，我想说：良好的魔法系统设计，是很多精彩情节的源泉。

# 第3章
# 霍格沃茨为何这么黑

## 3.1 魔法与科技

很多奇幻小说的故事背景，都是工业革命之前的世界，比如罗伯特·欧文·霍华德[1]的柯南系列。或者类似于中世纪，且不存在现代科技的平行宇宙，比如《指环王》和《地海传奇》。还有些作品，让魔法与现代世俗生活并存。作为最后一种类型的代表，"哈利·波特"系列提供了一个便于对比魔法与现实世界的范例。

《火焰杯》一册中的赫敏·格兰杰曾经说起，大多数现代电器无法在霍格沃茨使用的原因，是因为那里积聚了太多魔法能量。这也是设定在现代世界的城市幻想小说常用的处理方式。"德雷斯顿档案"系列中的哈利·德雷斯顿无法拥有电脑和配备电子系统的汽车，因为这些东西一靠近他，就常常坏掉。德雷斯顿的公寓和"哈利·波特"系列中大多数人的家里都用蜡烛照明。"哈利·波特"系列中的大多数魔法师对现代"麻瓜"们的生活方式无知到了夸张的地步。以至于不会使用"远话"。如果仅仅考虑生活便利程度，才没有人想做魔法师！在这一方面，我们有很多话题可以说，但其中有一个是多数作者都忽视了的：如果仅仅依靠蜡烛来照明，霍格沃茨那样的城堡和德雷斯顿的家，会暗到什么程度呢？

---

[1] 罗伯特·欧文·霍华德（Robert Ervin Howard，1906—1936），美国著名作家。作品有恐怖、冒险和奇幻等类型。国内出版过《蛮王柯南》，代表作还有《女王神剑》、《所罗门凯恩》和《布兰麦克蒙》等。

## 3.2 照明问题

“哈利·波特”系列中的很多情节，都发生在一座巨大的城堡里。城堡名字叫做霍格沃茨，在苏格兰某地。书中详尽描绘了很多关于这座城堡的可爱细节，里面有鬼魂、会自动移动的楼梯、有生命的画像，等等。霍格沃茨的主厅是城堡里最重要的处所之一。这里是学生们用餐、大考（比如 OWL 考试）和学习幻影移形的地方。在《哈利·波特与魔法石》中，对哈利初次见到的大厅是这样描写的[201]：

> 哈利做梦也没有想到过这么奇美壮丽的地方。这里有成千上万根明晃晃的蜡烛飘在空中，照亮大厅里的四条长桌，其他学生就坐在这些桌子的边上。

就算是有无数的蜡烛照明，我还是怀疑霍格沃茨的大厅是个光线很暗的地方。人们很少会提到，但生活在现代社会最大的好处之一，就是能用电灯给黑暗的房间照明。这里面有故事可讲。

在爱迪生发明电灯之前，所有人工照明手段都需要火，需要点着一点什么东西。如果你在停电的晚上做过作业就会知道，烛光下的作业时间一点也不像怀旧小说里写的那么浪漫而富有古韵。大多数时候，你都在努力调整书本方向，以便捕捉到尽可能多的光亮。不管蜡烛看起来有多么明亮，光线却依然暗淡，很难借着它的光亮读书。

这也是电影总是给人错误印象的一处细节。在几乎所有的历史影片中，烛光下的房间看起来都像电灯照明一样明亮。这么做的原因也很简单：让现代观众看演员在几乎漆黑一团的环境里乱撞，会让人跟不上故事的节奏。但是，蜡烛与火把的照明效果奇差，却是不争的事实。

对人眼来讲，光源并非生来平等。请试做下述实验：激光笔通常有红绿等色。找两根功率相同、颜色不同的激光笔，用它们照射白色屏幕或浅色墙壁。尽管功率相同，但绿色光点看起来却比红色亮得多。这是因为人眼的感光细胞对接近绿色的波段最为敏感，对红色的敏感度就没有那么高。我们视网膜上的那些细胞，仅能感知光谱范围非常狭窄的部分光线，任何波长处在这一波段范围以外的光，对人眼而言，都是不可见的。

要展开这个话题，我们就需要讲一下光的作用原理。光是一种电磁波，它更

像是小池塘水面上的波纹，而不是大海中的巨浪。我在图3.1中给出了波的参考“外形”。

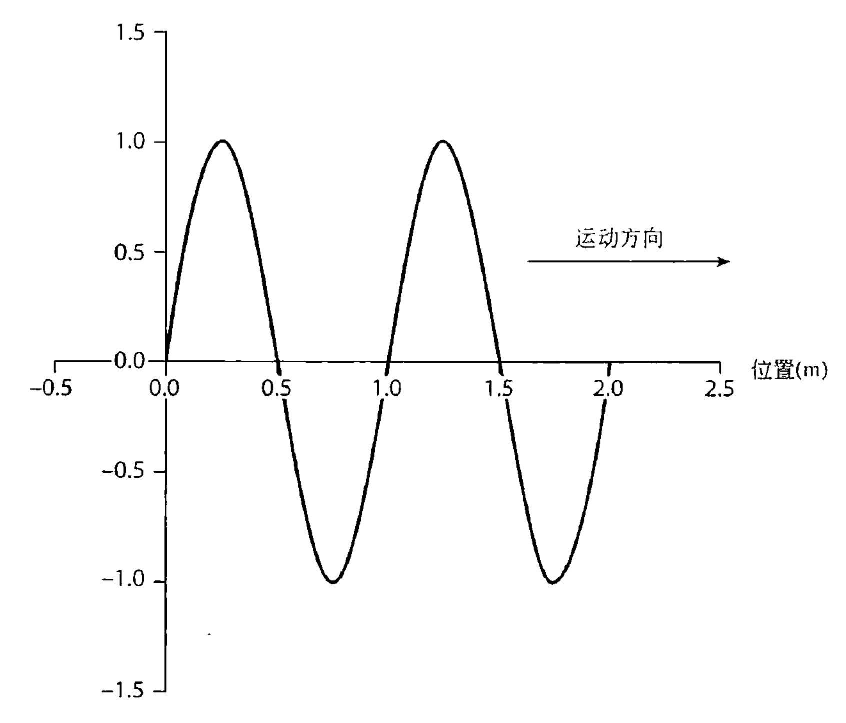



图3.1 波长为1m的波形图

图3.1的波向右移动，它是某种物体波动所形成的，波动的主体是什么，取决于波的类型。如果图形演示的是水波，它就是水面上的山峰样突起。如果图示对应的是声波，它就是被压缩的空气。如果它是光波，它的实体就是电磁场中的振动，比其他情况稍稍复杂一点。具体如下：

- 通常状态下的物质由三种基本粒子组成为质子、电子和中子；
- 电子和质子带电，人们约定质子所带的电荷为正电，电子所带的为负电。中子不带电，正如其名称显示，中子是中性的；
- 电荷同性相斥，异性相吸。

到现在为止，前面的内容还是大家在初等化学课上学过的内容。但下面的内容，就是你未必知道的了。

- 取甲地的一颗带电粒子，设法使其上下振动，那么在一定距离之外，另一颗带电粒子也会随之上下振动；
- 但是，第二颗带电粒子，要经过一些时间才能开始振动。如果两颗带电粒子相距1m，那么第二颗带电粒子开始振动的时间，是1/299 792 458s

之后；

- 距离越远，所需时间越长，反之越短。振动相隔的时间，与带电粒子之间的距离，存在下述数量关系，

$$x=ct \tag{3.1}$$

其中 $c$ 是（真空中的）光速。它被定义为

$$c = 299\ 792\ 458\text{m/s}$$

正如所有人知道的，这也是我们的宇宙中，任何物体能够达到的最快速度。[A]

我们想要说，有某种东西在两颗带电粒子之间移动，我们把它称为“光波”。我们测量得到的数据很简单：甲地有带电粒子上下振动，一段时间延迟之后，乙地带电粒子也随之上下振动。因为我们希望把能量看作守恒的，就说光波把能量从第一颗带电粒子传给了第二颗带电粒子。光基本上就是这么回事：当你远望星辰，星星上的电荷在上下振动。很多年以后，你视网膜上的电荷也呼应着上下振动，导致电信号传导到你脑中的视觉中心，产生视觉信息。

只是，你的眼睛不会对所有光线产生反应。要理解这一点，需要先引入两个概念：

光波的频率 $f$ 是指每秒电荷上下振动的次数。它是每秒中周期性振动重复次数的计量，称为赫兹（Hz）。

光波的波长 $\lambda$ 是指光波中彼此相邻的波峰之间的距离（参看图 3.1）。字母 $\lambda$ 是希腊文字母表中小写的“拉莫达”，跟罗马字母表中的“l”对应。

波长与频率之间，存在下述简单的数量关系：

$$f\lambda=c \tag{3.2}$$

以此推算，每秒发生一次周期性波动的光波，波长将有 3 亿米长。这个波长数值非常大，远远超出人眼可见的范围。理论和现实中，光波的波长都可以是任意数值。

大多数光源所发出的光都是几种不同频率的光的混合体（唯一例外的是激光）。光源的视觉亮度，并非取决于它的总功率，而是取决于它发射出来的光有多少处在可见光范围内。红外激光器的功率可能达到几千瓦，但由于它所发出的光是不可见光，作为照明光源就完全无用。人眼可见的光波波长范围很窄，仅限于波长 350～700nm。纳米（nm）是一个很小的长度单位。1nm 等于 1m 的十亿分之一，仅相当于头发丝直径的万分之一。波长越短，频率就越高。600nm 波长的光，其频率为：

$$f = c/\lambda = 3\times10^{8}\,(\text{m/s})/600\times10^{-9}\,(\text{m}) = 5\times10^{14}\,\text{Hz}$$

对人眼而言，这种波长的光线将显现为橙色。通常来讲，波长为 350～500nm 的光为紫色或蓝色；波长为 500～600nm 的光，色阶由绿直到黄橙；波长为 600～700nm 的光，显现为橙色或红色。在所有这些可见光波长范围内，人眼最敏感的是 555nm，也就是绿光。

蜡烛、火把和白炽灯之类的光源，依靠加热或燃烧来产生光。用物理学术语来讲，它们都属于“黑体辐射源”。本书中，黑体辐射源是个非常重要的概念。比如，所有的恒星，本质上都属于“黑体辐射源”。一个发热光源有两种核心属性，即它的辐射面积和温度。使用斯蒂芬-玻尔兹曼公式，可以计算出发热光源的发光功率（每秒钟释放出的能量）：

$$P=\sigma A T^4 \tag{3.3}$$

其中，

- $P$：发光功率（单位为 J/s，或者 W）
- $A$：发光区域面积（单位为 $m^2$）
- $T$：绝对温度（即以绝对零度为基准的温度，单位为开尔文，记为 K）
- $\sigma$：斯蒂芬-玻尔兹曼常数：$\sigma=5.67\times10^{-8}\,W/m^2K^4$

这些光分布在很宽的波长范围内。图 3.2 展示了几种不同光源的黑体谱。尤其可以看出，在波长较短和较长之处，曲线代表的数值都较小，而在中等波长处数值较大。“波峰”处的波长，仅仅由温度决定：

$$\lambda_{peak}=2900\text{nm}\times\frac{1000\text{K}}{T} \tag{3.4}$$

这并不是公式的基础形式，而只是便于计算“波峰”处波长的版本。例如，太阳表面的温度是 5800K，推出其光谱中波峰处的波长是：

$$\lambda_{peak}=2900\text{nm}\times\frac{1000\text{K}}{5800\text{K}}=500\text{nm}$$

公式(3.4)表明，光源温度越高，波峰处的波长越短。除了黑体谱之外，图 3.2 还展示了人眼对不同波长光线的敏感程度。请注意，人眼最敏感的波长范围(550nm)，与太阳光谱中的波峰(500nm)非常接近。图中的其他光源，温度都要比太阳低得多。其光谱与可视范围的对应情况也要差得多。这就是本章主题的关键所在。

工程师们用流明(lm)这个单位来度量光的亮度。因为人眼对不同波长光的感受力不同，因而在流明与瓦特之间，并不存在直接的单位换算关系。实际的换算结果和光源的“发光效率”，取决于光源属性。本书有一份在线附录（网址：

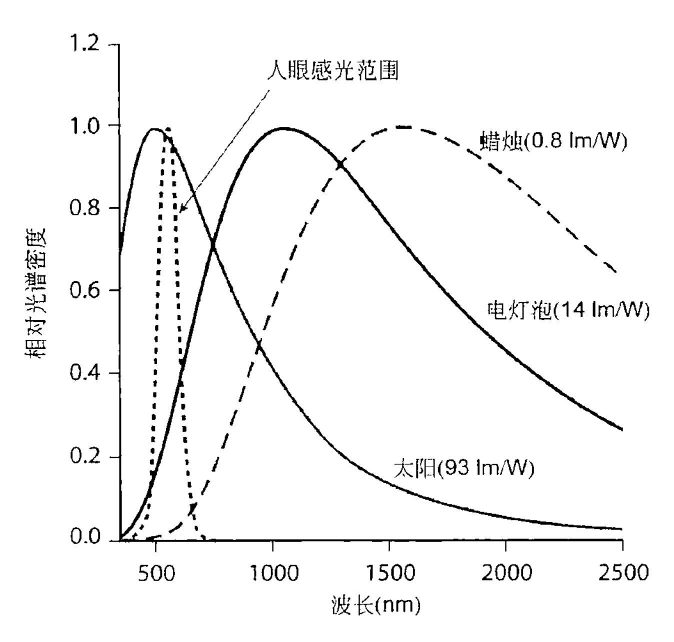



图 3.2　不同光源的光谱分布

press. princeton. edu /titles /10070. html)描述了如何根据黑体光谱计算光源亮度的方法。有兴趣的读者可以自行参考。但总体而言，光谱与人眼可见光重复程度越高，亮度就越大。“发光效率”的概念，就是用来衡量光源亮度的：

$$B=LP \tag{3.5}$$

其中，

- $B$ 是光源的亮度(单位为 lm)
- $L$ 是“流明功效”(单位为 lm /W)
- $P$ 是光源发光的总功率(单位为 W)

$L$ 的最大可能数值是 683 lm /W；只有在使用激光发射波长为 555nm 的光时，你才能达到这么高的数值。任何黑体光源的发光效率都要比这个值低得多，甚至包括太阳。其中影响最大的因素，就是各种光源的温度 $T$。我的朋友雷蒙德·李是自然光源和人工照明设备方面的专家。应我的要求，他测量了两种人造光源的光谱发射率和黑体温度，一种是 75W 的钨丝灯泡，另一种则是蜡烛。根据他的测量结果，我们得知：电灯泡的有效黑体温度是 2740K，蜡烛的则是 1850K。还可以测出蜡烛光谱的功率总和。根据实验数据我们得知，蜡烛的发光总功率为 15W，数据的误差范围为±15%。

表 3.1 列出了不同光源的流明功效值。

表 3.1 几种不同光源的发光效率

| 光 源 | 温度/K | 发光效率/(lm/W) | 功率/W | 亮度/lm |
|---|---|---|---|---|
| 太阳 | 5780 | 93 | 不明 | 不明 |
| 钨丝灯泡 | 2740 | 13 | 75 | · 975 |
| 蜡烛 | 1850 | 0.8 | 15 | 12 |

蜡烛的亮度远远低于电灯泡,由于以下两方面原因:

(1) 它的照明功率仅有电灯泡的 1/4。

(2) 这部分功率转化来的光,处于可见光范围内的比例更小。

第二点更为重要。由于蜡烛的黑体温度更低,它所发出的光多半是红外线。红外线属于不可见光,在照明方面毫无用处。仅有 1%的烛光在可见光范围以内,而钨丝灯泡的相应数值为 10%。图 3.2 中,我展示了每种光与人眼感知范围的重合情况。太阳光与可见光的重合程度非常高,钨丝灯泡的情况则没有那么理想。蜡烛光谱与可见光,则几乎没有重合。因此,灯泡将显得比蜡烛亮 80 倍![B]

让我们回到引出本章主题的问题。霍格沃茨的大厅照明情况到底怎样?光源的照明效果如何,取决于它的光照度,也就是流明值除以它所照亮的面积。也就是说,只点了一根小蜡烛的大体育馆,要比弧光灯照耀下狭小的扫帚间更暗。于是,我们需要算出霍格沃茨大厅的面积。我写这段话时,是在国会图书馆的主阅览室。看起来,这里应该与霍格沃茨的主厅面积接近,尽管形状不同。我步测了一下,圆厅直径约为 30m(也就是 100ft① 左右),面积约为 $700m^2$。大厅的光照度,就等于全部光源的流明值总和,除以需要照亮的面积。

要得到严谨的数字,可能会非常麻烦,但我们可以按照下述办法推算。假设所有蜡烛照明效果完全一样,向任何方向发射的光也都一样。一半的光方向向上,因而完全无法起到照明作用。至于剩余部分,还会有些光横向发出,尽管有部分会被墙面折射,因而不至于完全流失。我假设有 40%的光可以起到实际照明作用。所以,整体照明度为:

$$I = \frac{0.4 \times 5000 \text{只蜡烛} \times 12\text{lm}/\text{只蜡烛}}{700\text{m}^2} = 34\,\text{lm}/\text{m}^2$$

这是整个大厅的平均值。有些地方会更亮一点,有些地方会更暗一些,但区别不会太大。这样的光照条件,远不足以用来读书写字,这些活动通常需要达到 $200\text{lm}/\text{m}^2$。大厅是用来进餐的场所,但即便是这类简单重复的活动,也至少需要达到 $100\text{lm}/\text{m}^2$ 的光照度。

① 1ft=0.3048m。

当然，这座大厅是有魔法加持的，所以房顶会显示外面的天空。白天的光线还是很不错的。也许，魔法学院的四位创始人之所以要给大厅施法，初衷就是为了改善这里的照明条件，因为中世纪的照明设备效果太差。太阳光的照明度可以达到 $10^5$ lm/m²，或者说，比蜡烛照明的效果好 1000 倍以上。但是等到晚上，蜡烛就成了主要光源。因为乡间的夜空非常幽暗。即便是满月，能够达到的照明度也仅有 0.2 lm/m²。请注意，这个数字衡量的并不是月亮看起来有多亮，比如它在罗恩眼里的样子；而是满月能为吃饭、读书等日常活动提供的照明效果。大致来说，霍格沃茨大厅中照明效果给人的感觉，就像太阳刚落山时站在户外：我们这些研究光和颜色的家伙们，管这个时段叫做“文明世界的黄昏”。

细细考虑这一问题，也会带来一些其他疑问。首先，蜡烛需要直立，才能正常燃烧，但是直立的蜡烛下面，又会留下一圈无法照亮的黑影（蜡烛本身的影子）。这会让能够到达桌面的光进一步减少。

第二，这样大手笔使用蜡烛，涉及的经费将非常可怕。他们有可能每天都需要把所有蜡烛更换一遍。如果假设一根蜡烛 1 美元，每天就要花费 5000 美元，或者说（假设每学年上课 200 天），仅大厅一处的照明支出，每年就要达到 100 万美元。保守估计，整座城堡的照明支出，应该超过大厅的 10 倍，也就是每年 1000 万美元。用魔法币计算，可能有 100 万金吉伦，或者每名学生每年 1000 金吉伦。相比之下，用电力为一幢建筑照明，成本就要低得多。按照前文数据，如使用钨丝灯泡，我们使整座城堡的照明度达到 200lm/m² 的话，也只需要 10kW 的总功率，足以满足用餐、读书等需求，假设每小时 1kW 的电力成本为 0.1 美元，大厅每天 10 小时照明时间的花费是 10 美元，或者说，仅仅是蜡烛照明成本的 500 分之一。（学生才能交几块钱学费?）最后，这些蜡烛燃烧过程中，免不了会有蜡油滴落到用餐的学生身上。让我有些吃惊的是，居然没见过德拉科为这样的事抱怨。

对这章内容可能提出的一种反驳意见就是：“那些都是魔法蜡烛，所以它们比普通蜡烛更亮，而且不会滴蜡，而且不用花一分钱。”这个意见完全可以接受。尽管罗琳本人从来没有这样写。如果这样认定，也不会跟书中的情节有任何抵触。但毕竟，我们也可以说，这是一本精彩小说中的一个有趣细节，我们也可以把它当真，然后看这样的前提会得出怎样的结论。我个人觉得，相对于完全接受书中的假设，第二种态度要更加有趣得多。

**注：**

A. 我们会经常取光速的近似值 $c=3\times10^8$ m/s，在所进行的计算中，这个数字几乎总是足够精确。

B. 当然，钨丝灯泡本身也不是理想的照明器材，所以人们才正在改用压氟节能灯。节能灯的有效发光温度更高，因为有更多光处在可见光范围以内。

# 第 4 章

# 魔兽及其证伪

## 4.1 神龙现身

奇幻小说的一大特色，就是有幻想色彩的神奇生物参与。其实科幻小说也一样，只不过科幻中的神奇生物被称作“外星人”，而不是妖魔鬼怪。但是在很多作品中，两者之间并不存在本质性的区别。守在桥头的巨魔会评判冒险团队，决定是放他们过桥，还是把他们吃掉。来自半人马座 $\alpha$ 星的外星人则会对整个人类做出评判，决定是给我们传授先进技术，还是毁灭人类。

两者之间最大的区别，或者说硬科幻（基于科学理论展开情节的科幻）与奇幻小说的区别，是科幻小说中的外星人需要“自圆其说”，也就是说，它们的生理特征必须合乎已知的科学知识系统。这并不意味着它们需要与奇幻小说中的怪物或其他生物严格划清界限。比如，在罗伯特·海因莱因的小说《太空人琼斯》中，进攻人类外星基地的外星人，样子就很像希腊神话中的人头马，外形结合了人类与马的特征[122]。海因莱因的另外一部小说《光荣之路》中，有一种很像是龙（也就是体形巨大、会喷火的蜥蜴类）的生物登场，只不过它们不会飞[116]。当然，这部小说有着浓重的奇幻气息。此外还有无数的其他范例，其中的外星人形象类似于神话或奇幻作品。

这就引出了一个有趣的问题：奇幻小说中哪些生物是可能存在的，哪些不可能？或者说，如果我们去奇幻小说世界里搞一场人口普查，会有哪些生物能够被引入科幻作品，而无须做出太多的世界观调整？下面是“哈利·波特”系列中出

现过的几种神奇生物(当然不是特有的)：人头马、巨人、独角兽、巨蛛、鹰头飞马① 和龙。它们中的哪些可能存在，哪些不可能存在呢？要回答这一问题，我们就需要了解生物体形的大小与身体比例的关系，以及这对生物习性和新陈代谢的影响。

## 4.2 如何构造一个巨人

前几年有部电影叫做《阿凡达》，其中的故事发生在潘多拉星球上。这颗星球，是围绕半人马座一颗恒星转动的气态巨星的卫星。潘多拉星球表面的重力约为地球重力的 80%。潘多拉星人被刻画为身材高挑的种族，身高约 8ft，力量远远超过人类。这些设定准确吗？结合潘多拉星球的自然条件，这里的居民应该有多高呢？

这个问题牵扯到很多需要考虑的因素，生物学中的不少原理都会影响问题的答案。不过，仅靠生物力学的基本原则，我们也能得出大致的结论。如果我们想构思出合理的巨人形象，该从何处入手？我们能不能从人类的生理特征出发，然后把所有器官都等比放大两倍呢？或者还应该有更复杂的考虑？

20 世纪 20 年代早期，伟大的数学家兼生物学家 J. B. S. 赫尔丹写过一篇著名的论文——《论生物躯体的最佳尺寸》[106]。在文章中的一个部分，作者探讨了故事中的巨人(比如《朝圣者异闻录》中的异教巨人)能否直立的问题。这是一个非常有趣的切入点。如果我们从体形小的动物(比如昆虫)开始观察，再去跟较大的动物(比如大象)对比，就会发现，它们的体型并不十分相似，而是存在着有章可循的变化趋势。昆虫的腿特别纤细，比它们的躯体细瘦很多，而大象以及其他体形硕大的动物的腿，跟身体相比，则明显更为粗壮。此外，没有什么比人类更大的动物能够两脚站立，哪怕很短时间。这在一定程度上验证了一条古老的定律，这条定律是伽利略提出的，通常被称作平方-立方定律：*动物的体重与其大小的立方成正比，但其支撑结构的尺寸，仅与身体大小的平方成正比*。这条定律有很多推论，而且也不是生物学界关于动物体形的唯一定律。所以，我们还是要慢慢道来。

让我们开始建立一个两足动物的模型，他可以是人类、潘多拉星人或者巨人。

---

① 系列电影中文字幕中被称作“鹰头马身有翼兽”。

我们可以从两根柱子支撑着的一具躯干开始。对一个静止不动的模型来讲,这就够了,后面我会讲到它走路的时候怎么办。在两根柱子倒塌之前,可以在上面放多大重量呢?以后我们会知道,这将决定两足动物的基本结构。

现在我们开始建立人类模型,是一个圆柱形(头部和躯干),放在两根圆柱形支柱(两腿)上。我们暂时不特别考虑手臂和头,因为我感觉它们的重量跟躯干相比要小很多。我还将无视腿部的重量。这当然是个过于简单化的模型,不过作为分析问题的起点来讲,已经足够了。我们假设躯干的长度($L$)与腿的长度相等,圆柱形的截面半径约为高度的1/6。也就是说,截面的周长大致接近于圆柱体高度。参照一下大多数人的腰带长度,这应该算是个接近现实的假设。显然,我是在努力做出一个粗线条的人类形象。

这样的躯干的体积为

$$V=\pi r^2 L=\pi L^3/36\approx L^3/12 \tag{4.1}$$

而其质量将是$M=\rho V$,其中的$\rho$是人体的平均密度,非常粗略地说,大致等于水的密度($1000\mathrm{kg/m^3}$)。利用这种方法对人体质量的估计,还是比较准确的。简单代入一下。身高$2L=1.8\mathrm{m}$的人类,计算得出的躯干质量为60kg或130lbs[①],这跟实际情况接近。

我们现在感兴趣的,是支撑圆柱(也就是腿)的宽度。问题的焦点是比例问题。在我们把质量在人的基准上加大,达到巨人级别的过程中,整个形状会不会大致保持原样?也就是说,这两条腿的粗细与长度的对比关系,是将保持原样,还是像赫尔丹说的那样必须变得更粗?此外,我们能否估算出这种巨人可能达到的最大高度?不管是在地球,还是在潘多拉星球这类重力加速度数值不一样的地方。

此外还有一个需要提出的问题,我们为什么要做前面的假设?也就是说,怎么能确定躯干长度一定与腿部长度相等?躯干周长是否一定与其长度成比例?下面,我们还将逐一回答这些问题。

## 生物体比例

在生物力学领域,器官大小的异速增减原则有着非常重要的地位。异速增减原则对应于两种不同的生物属性值,并用下述公式表示两者之间的数量关系。

$$y=ax^b \tag{4.2}$$

① 英制质量单位磅(lb)的复数形式。

公式中的独立变量，常常就是生物体的质量，主要是因为这个指标非常容易测量。例如，让我们考虑质量与上文建立的“圆柱形躯干”之间的关系。我们可以给出下面的公式，根据质量算出躯干长度：

$$L(\mathrm{m})=0.22M^{1/3}(\mathrm{kg}) \tag{4.3}$$

我们认为身体长度与质量之间可能存在这样的数量关系，因为质量与体积成正比，而体积又与长度的立方成正比。这一公式的另一种表达方式是，如果我们有两种形状相同、大小不同的生物，它们的体积之比等于长宽高等数据的三次方之比。如果大小扩大两倍，体积和质量将扩大 $2^3$，也就是 8 倍。

这层比例关系，只有在两种生物体的形状完全相同时才能完全适用。而现实中生物的形体，当然是林林总总，各自不同。不过，对多种动物质量和身长的研究结果表明，长度与质量的立方根成正比的对应关系，还是比较经得起实测数据考验的。表面积与质量的对应关系，则由下面的等式给出：

$$A \propto M^{0.67}$$

这个等式，也与几何学中的相关计算公式一致。

我们回到巨人的问题。如果质量超过一定的限度，类似于腿骨的支撑结构就会被压断。伟大而博学多才的数学家莱昂哈德·欧拉，是第一个研究这一问题的人，相应的术语也因此被称作“欧拉折断限度”：截面半径为 $r$，长度为 $L$ 的圆柱体，如果支撑的重量超过特定数值，就会被压断，极限重量的计算公式是

$$W_c=\frac{\pi^3 E r^4}{4L^2} \tag{4.4}$$

这里的 $E$ 是指材料的弹性系数，也就是材料对拉伸和弯折的耐受能力。我将假设腿部对身体的大小比例受到上述公式的约束，也就是说，生物的腿部必须粗大到足以承受身体重量而不会被压断的程度。我将不会代入数值做详细计算，而是从现有生物出发，进行缩小和放大。因为质量与体积成正比，而体积又与长度的三次方成正比，我们就可以写出下面的对应关系：

$$L^3 \propto \frac{r^4}{L^2} \tag{4.5}$$

上式可简化为

$$r \propto L^{5/4}$$

等式的另一种表达方式就是：$\frac{r}{L} \propto L^{1/4}$。随着动物躯体变大，腿部与身体其他部分的比例也将发生变化。巨人应该比普通人类显得粗壮一些，因为他们需要更粗壮的腿部来支撑身体重量。观察实际存在的四足动物，也会发现这一现象。

大象并不像等比例放大的马，按照相对于身体的比例来看，它们腿部要更加粗壮得多。《哈利·波特与凤凰社》中首次登场的巨人格劳普，被作者写成身高 16ft 的巨汉，比普通人类身高的 3 倍还高。他的腿部半径相对于自己身体的比例，就应该是人类的 $3^{1/4}=1.3$ 倍。坦率地讲，这个计算结果令我感到意外，因为我本来预计，他的腿还要更粗一些。当然，我们前面使用的模型还是过于简单，比如腿的长度，就被我默认为与身体的长度成固定比例，这一点是值得怀疑的。

对这一模型，还有一个有趣的佐证。骨骼的质量与体积成正比，对应关系是：$r^2L\propto L^{14/4}\propto M^{1.17}$。也就是说(至少对于腿骨而言)，腿骨质量增加的速度，应该快于动物全身质量增加的速度。这是经过了实测检验的结论：骨骼质量增加的速度为 $M^{1.08}$(质量增速的 1.08 次方)。这比我们刚才估算出来的比例要小，但两者之间的差距并不大。差额也许仅仅说明：现实中形态各异的动物不是简单放大或缩小得到的，所以我们刚才利用过度简化的两足生物模型得出的结果，会跟实测存在差距。

人们常常会看到这样的断言：体型巨大的类人两足生物之所以(至少在地球上)无法存在，就是因为“平方-立方法则”。也就是说，生物体重[①]增长的速度，大大超过了支撑身体的表面积增长。《物理教育》杂志最近刊登的一篇论文，在讨论动物能够达到的最大身高时写道：

> *动物骨骼的最小厚度应该是多少？要回答这一问题，我们需要了解骨骼和支撑肢体的耐受力。结构致密的物体，在断折之前能够承受的最大拉伸力，记作 $T_{br}$。*

作者随之继续写道，由于前文提到的法则，动物骨骼的截面直径，应该以长度 3/2 次幂的速度增长。这个是明显的错误。上文提到的身体比例法则已经表明，动物骨骼的截面直径相对于长度的增速，应明显更小(5/4＝1.2)。此外，如果把骨骼质量与整个体重共同考虑，得出的比值可能还会进一步减小。不过。作者的上述论断也并非一无是处。我们前面提到的模型限定腿部尺寸的原因，是为了避免其达到欧拉面曲。而在生物体质量较小的情况下，肢体因承重而折断的力，会小于其承受的压力。但是到达一定的身高/质量比之后，两者的大小关系就会反转。具体细节，请参看本书网上练习题。

我们还可以做一些其他有趣的计算。比如，两足动物的行走速度，取决于两

① 原说法为体积，由于质量与体积成正比，所以作者在此处直接采用“体重”来描述该法则。

腿摆动的频率。具体细节可以参照斯蒂文·弗格尔的教材《生物力学比较教程》。但基本上，摆的周期等于$\sqrt{\frac{L}{g}}$，其中 $L$ 是摆的长度，而 $g$ 是重力加速度[243]。如果把双腿看作运动中的摆，摆长为 $L$，那么步幅将与 $L$ 成正比，于是行走速度就将与 $L/\sqrt{L/g}\propto\sqrt{gL}$成比例。如果我们假设普通人的行走速度是 4mile/h（约 1.8m/s），$L$ 的值约为 1m，就可以得出下面的等式：

$$v_w = 0.6\sqrt{gL} \tag{4.6}$$

有几点需要说明：

- 体形较大的动物，行走速度通常高于较小的动物。有趣的是，随着体型增大，每一步所花的时间是增加的，但步幅增大的效果，会远远超过步调放慢带来的损失。
- 由于上述公式(4.6)中 $g$ 的影响，重力较大的星球，会出现行动更为迅捷的生物。

体形相当于人类 3 倍的格劳普，行走速度应该比人类快 70%。尽管由于迈步所需时间更长，他的行动会显得笨拙费力。

现在我们回到潘多拉星人的问题上。跟人类相比，他们就像一群巨人。男性的身高有 3m，或者说 10ft 左右。相比之下，6ft 左右身高的人类也仅有 1.9m。他们行星表面的重力仅相当于地球表面重力的 80%。因此，受到重力减小的影响，潘多拉星表面人类的行走速度，应该会比在地球上降低 10%。这应该可以让人察觉到的，但电影中并没有表现出来。不过，由于体形方面的差异，潘多拉星人的行走速度应该比人类快 30%。请注意，由于潘多拉星人与人类的行走姿势非常接近，以上结果根据非常简单的物理学原理就可以推出。

这些关于身体大小及比例的法则是否准确呢？对它们的运用，应该多加小心。由于下述几方面的原因，导致我们不能毫无保留地接受计算结果。

- 首先，这些考量都来自一般物理学法则，在特定环境、特定外部条件下，可能并不适用。
- 其次，严格来讲，大小及比例的法则仅适用于身体形态非常接近的不同物种。举例来说，这些法则应该适用于对比人类和幻想中的巨人（因为他们是彼此相似的两足动物）。但不适用于人与马，或马与鹰之间的对比。不过，并不存在什么物种完全是其他物种的缩小或者放大。所以，对这里的计算结果，就总是需要有所保留。

• 最后，所有这些大小及比例法则，都需要实验结果验证，而这些数据，并不那么容易取得。人们很难给出精准的放大或缩小比例。涉及的数据常常有10%左右的误差，有时甚至更多。

针对现实中的动物所展开的身材与大小比例研究表明，上文提到的原则都是可能在现实中存在的，但无法严格证明。实际数据总是有太多的模糊不清之处。具体说来，表面积大致与质量的0.63至0.67次幂成正比。当人们只需要考虑几何变换，而不需要考虑身体结构稳定性的时候，这个指数值会更高。

## 4.3 克莱伯定律之一：美人鱼

"你懂的，鲸鱼可不是鱼……它是一种昆虫。"

——蒙蒂·派森[①] 《秘密警察的舞会》

### 4.3.1 美人鱼不是鱼

我有一个重要发现，也许称得上20世纪神奇动物学领域最重大的发现之一：美人鱼不是鱼。也许我应该说"鱼人族"来着……严肃点说，其实这个结论很明显。只要略微留意一下流行文化中对美人鱼形象的描述就会发觉。其中最大的线索，就是所有的鱼人尾鳍都是水平方向的。这意味着它们属于海洋哺乳动物，是鲸的近亲，而根本不属于鱼类。也许我应该再深入解释一下。

赫尔曼·梅尔维尔[②]最著名的作品，就是小说《白鲸记》。这个故事中并没有出现美人鱼，可是乖乖，提到鲸鱼的地方可真是不老少！在题为"鲸类学"的章节中，他长篇大论探讨了鲸是不是鱼类的问题：

那么简单地说，鲸就是一种会喷气泡、又长着水平尾鳍的鱼类。这样说就够了。海象也会像鲸一样喷气，但海象不是鱼类，因为它们水陆两栖。但刚才提到的鲸的第二种特征，却比第一种更为引人注目。几乎尽人皆知，所

① 蒙蒂·派森(Monty Python)，又译为"巨蟒剧团"，英国超现实幽默表演团体。其创作的英国电视喜剧片《蒙蒂·派森的飞行马戏团》，于1969年在BBC公开播出，共播出了4季总计45集。

② 赫尔曼·梅尔维尔(Herman Melville，1819—1891)，美国小说家、散文家和诗人，也担任过水手、教师，最著名的作品是《白鲸记》。

有在陆地附近生活的鱼类，尾鳍都是竖直，或者说上下方向的。而对会喷气泡的鱼类而言，尽管它们的尾鳍形状与其他鱼类接近，方向却是水平的。

梅尔维尔把鲸看作鱼的同类，但同时引用了生物学家持不同意见的几大原因：鲸鱼用肺，而不是用鳃呼吸；鲸鱼是胎生，而且用乳汁哺育后代，不像鱼类那样产卵；鲸鱼还会喷气。此外，在几乎所有关于美人鱼的描述中，她们都长有水平方向的尾鳍，而所有真正鱼类的尾鳍都是竖直方向的。这一区别，意味着她们游泳的方式大有不同。以鲨鱼为例，它们游泳是依靠前后扭动身体的方式，任何人类都无法轻易地像它们那样游泳。而鲸游泳，靠的是上下摆动尾鳍，这是任何人类都很容易模仿的游泳动作。其背后的原因，正是因为鲸属于海洋哺乳动物。数百万年以前，鲸的祖先离开陆地，返回海洋世界。它们的两条后肢逐渐黏合到了一起，形成现在的尾鳍，但体内的骨骼结构仍然大致保持原样，也就是它的关节仍就更适合上下摆动。事实上，动画制作者查克·琼斯，在向动画制作人员展示海豹的游泳姿势时，就抓来他的一个外孙，把他的两手绑在身边，两腿捆在一起，然后在手脚上都固定了划水板，再然后，就把这孩子丢进水里去[131]。这孩子为了不溺死而做的动作，就跟海洋哺乳动物游泳的方式非常相似。

通过上文的讲述可以看出，鱼人应该就是几千年乃至几百万年前离开陆地返回大海的类人生物。如果考虑到水手们声称与美人鱼发生过的，嗯……“互动”，这一点就更加清楚了。描述人类与美人鱼接触最优秀的作品之一，是《豹》的作者朱塞佩·迪·兰佩杜萨①创作的短篇《教授与美人鱼》。故事中的教授在攻读古典学研究生期间遇见了美人鱼。其中的美人鱼拉里娅被描写成女神与野兽的复合体。而在故事末尾，教授从一条船上投海，似乎暗示他回到了美人鱼身边。还有其他一些类似的故事，最著名的当数安徒生的童话作品《小美人鱼》，其中写到一名小美人鱼爱上了帅气的人类航海者。如果她只是某种鱼类的话，这个故事显然不会那么受欢迎。在迪斯尼版的动画片中，爱丽儿只是一个长了尾巴的小女孩，尽管这条尾鳍也是水平方向的。

有趣的是，“哈利·波特”系列中的美人鱼，反而像是某种鱼类。在《哈利·波特与火焰杯》一册中，她们被写成有鳃的动物。电影版本虽然不太容易看清，但经我仔细观察，她们的尾鳍真的被做成了竖直方向，游泳时沿左右方向，而不是上下方向摆动。这不禁令人怀疑，幻想世界中应该生活着两种形态非常接近，但分别

---

① 朱塞佩·托马西·迪·兰佩杜萨(Giuseppe di Lampedusa，1896—1957)，第11代兰佩杜萨亲王，西西里作家，因唯一的长篇小说《豹》(Il Gattopardo)而知名。

属于不同物种的鱼人。而在同一部电影中，级长浴室中出现的美人鱼形象，则与人类更加接近，连尾鳍都是传统的水平方向了。

### 4.3.2 克莱伯定律：代谢率与肺活量

如果人鱼一族真的是海洋哺乳动物，他们能在水下待多久呢？所有的海洋哺乳动物，例如鲸鱼和海豚，时不时都需要浮出水面来换气。让我们在两个假设前提下试着计算这一数据：

- 任何动物的代谢率，都与它吸入空气的速度成正比（实际等于吸入空气的流量）。
- 代谢率与质量 $M^{3/4}$ 成正比。

上述第一条很容易理解，因为新陈代谢需要氧气才能进行。代谢率，或者说身体消耗能量的速度，必然与每次呼吸摄入空气的质量除以呼吸时间间隔得出的结果成正比。第二个前提在生物学中被称为克莱伯定律，名称来自最早提出这一表达式的生物学家。这一公式得到了大量实验数据的支持，适用于各种大小不同的生物。不过，对其中个别数字的取值，还有一点争议。据我所知，克莱伯定律能够成立的最根本原因是什么，目前还没有合理的解释。

代谢率的数值，与肺活量乘以平均呼吸频率的结果成正比：

$$M \propto V_L \times R_B \tag{4.7}$$

其中的 $M$ 是平均代谢率，$V_L$ 是肺活量，$R_B$ 是每秒平均呼吸次数。有一个不太容易处理的情况：当鲸鱼浮上水面，喷出气孔里的水之后，它们通常会在下潜之前呼吸很多次，这让它们能够在水下停留更久。

研究毫无意外地发现，动物肺活量与个体体积成正比，也就与质量成正比。据此，再考虑到克莱伯定律的影响，我们可以得出瓦尔特·斯塔尔提出的下列公式[224]：

$$R_B \propto M^{0.75}/M^1 \propto M^{-0.25}$$

随着动物体形变大，它每秒钟需要完成的呼吸次数就会减少。这就是鲸鱼每次可以在水下停留很久的原因。研究数据验证了上述比例关系。斯塔尔的论文中还给出了下面这一等式：

$$R_B = 53.5M^{-0.26} \times \text{每分钟呼吸次数} \tag{4.8}$$

用动物的质量(kg)来计算平均呼吸率，根据这一公式，体重为 80kg 的成年男

性，每分钟需要呼吸 17 次。这相当于 3 秒左右呼吸一次，贴近实测结果。由于受到水的浮力影响，鱼人的体重可以远远超过人类。如果我们假设鱼人的质量是人类的 5 倍，即 300kg，可以算出他们所需要的呼吸次数是每分钟 12 次。也就是说，体重变化时，呼吸频率的变化并不明显。如果我对鱼人体重的估计正确的话，估计鱼人能在水下停留的时间，仅比人类长 40%。对水中生活的适应，可能会让他们有能力在水下停留更久，只要在浮出水面换气时能够“疯狂大喘气”（找不到更拉风的词儿了）就行。不过，没有任何证据表明，他们能像童话或电影里展示的那样，在水底憋气那么久。一个可以用作对比的案例是第二次世界大战期间的德国 U 型潜艇。它们是配备了柴油发动机的小型舰船，只能在水下停留几个小时。现在的核潜艇非常巨大，一次下潜就能在水下停留几个星期。鱼人跟鲸的区别，就像 U 型潜艇与现代核潜艇的区别一样。

## 4.4 克莱伯定律之二：猫头鹰、龙、鹰头飞马和其他飞天神兽

> 你叫什么名？要往何处去？你可曾知晓，自由的燕子飞过空中的速度？
>
> ——老人的台词 《蒙蒂·派森与圣杯》

引用一段 J. B. S. 赫尔丹的话：

> 航空学中的一项基本法则就是：不同形状的飞行器，停留在空中所需的最低速度会有所不同。与其长度的平方根有关。如果飞行器的平面尺寸增加为原来的 4 倍，最低飞行速度就要增加为原来的 2 倍。而达到最低速度所需的功率增加的速度会比飞行器自身重量的增长快得多[106,]18。

要详细探讨这一点，我们得考虑以速度 $v$ 掠过面积为 $A$ 的机翼周围的空气。由于机翼被设计成图 4.1 所示的形状，流过的空气就会产生一个向上的升力。升力产生的原因，是机翼的形状导致空气向下流动，也就是存在一个将空气下压的力量。根据牛顿第三定律，必须存在一个大小相等、方向相反的力，将机翼向上托起。这种力的表达式为

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2 \tag{4.9}$$

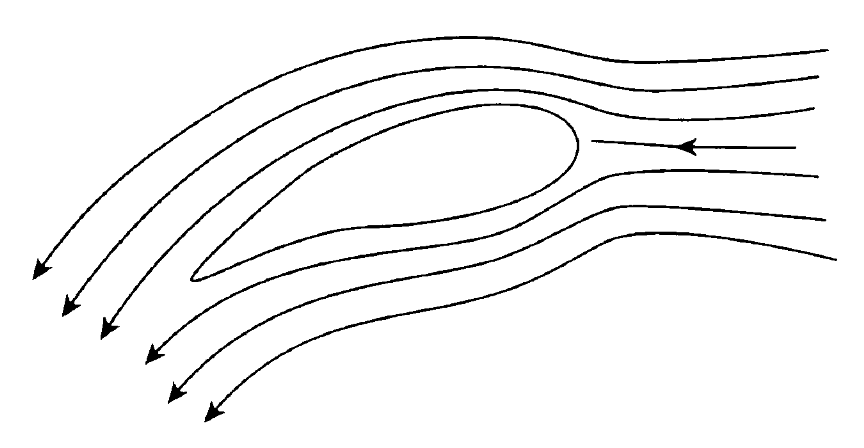


图 4.1 机翼表面的气流

其中的 $\rho$ 是机翼所经之处的流体密度。对空气而言，相应的数值是 1kg/m³。$A$ 是机翼表面积，$C_L$ 是无量纲升力系数，数值通常接近于 1。根据机翼的形状和速度不同，它的取值可能略有区别，但变动幅度不大。我们这里可以简单把它看作 1。在稳定飞行，不攀升也不坠落的情况下，升力必须与飞行物重力相等。我们可以列出方程式，解出必要的速度值。

$$v=\sqrt{\frac{2Mg}{C_L\rho A}} \tag{4.10}$$

其中 $M$ 是飞行生物或人造飞行器的质量，$g$ 是重力加速度。所以说，最小飞行速度取决于质量与飞行物表面积的比值。如果变量 $L$ 代表飞行物某个方向长度的话，$M\propto L^3$，但是 $A\propto L^2$，所以 $v\propto\sqrt{\frac{L^3}{L^2}}\propto\sqrt{L}$。体型较大的动物必须保持较快的飞行速度，其数值与身体长度的平方根成正比。传奇故事中比大象还要巨大的鹏鸟，需要达到 100mile/h 以上的速度，才能保持飞行状态。

这里的公式同样适用于科幻小说。比如，《童年的终结》一书中写到的“霸主”(Overlord)就是一个长有翅膀的类人种族，他们生活在人造低重力环境中。他们的体型略大于人类，身高约为 7ft，体重大概也符合我们提到过的计算公式。造访他们世界的人类，不会因为当地的重力条件感到特别难受。让我们假设其重力加速度是地球表面的 80%。我估算，霸主们的飞行速度需要达到 35m/s(即 76mile/h)以上，才能停留在空中。但首先，他们能飞起来吗？这就是下一小节将要回答的问题。

### 4.4.1 代谢率与飞行能力

大型动物飞行面临的主要困难，是它们的代谢率难以达到足够高的水平，以至于无法为飞行提供足够大的功率。这间接地跟飞行所需的最低速度有关：体形较大的动物飞行，需要达到较高的下限速度，但高速度也意味着更高的功率需求。

飞行所需的功率，可以通过计算动物体飞行中遇到的阻力得出。而阻力数值可以利用下列等式计算：

$$F_L = C_D \rho A' v^2 \tag{4.11}$$

这个等式跟前文计算升力的等式几乎一样，为数不多的区别包括 $C_D$，它是另一个变量值，对流线型生物来讲，数值通常是 0.1；此外还有 $A'$，它是动物身体轮廓在身体正面的实际投影面积。公式代表了动物飞行中遭遇的阻力，其身体必须做功，才能让飞行兽向前移动。这个公式只能得出近似值，尤其突出的缺点，是容易高估较大飞行物遇到的阻力。此类生物常常借助上升气流在空中悬停或攀升。不过，这个简单公式作为参考还是很有用的。

飞行所需的功率，可以用公式 $P=Fv$ 得出，代入 $F$ 的计算公式就可以得到：

$$P = Fv = \frac{1}{2} C_D \rho A' v^3 \tag{4.12}$$

我们想知道的是，随着飞行兽身躯变大，飞行所需功率的变化趋势如何。在上面的公式中，值得注意的变量有两个：实际受阻面积($A'$)和速度($v$)。上文已经算出，速度 $v \propto L^{1/2}$，而受力面积与 $L^2$ 成正比，于是：

$$Av^3 \propto L^2 L^{3/2} \propto L^{7/2}$$

有本绝妙的著作值得所有人一读，这就是 C. J. 潘崔克的《鸟类飞行力计算手册》。该书主要讨论了如何使用电脑对飞行生物建模的问题。书中有大量实用的公式，可以用于估算任何飞行物的各种数据，无论是在地球还是外星世界。这也是我见过的书中，唯一展现过给鹅做风洞实验场景的[191](详见该书第51页图5.6所示)。在该书第 101 页，作者指出，动物代谢率与质量 $M^{3/4}$ 成正比，而飞行所需功率与 $M^{7/6}$ 成正比，正如我上文得出的结论一样。但是，他的计算过程要比我的复杂得多。而且他还利用自己的电脑模拟系统，给出了一份代谢率与飞行功率的对应情况图表。如果我在前文中的估计准确，其比值将随着动物体形的增大而增加。

$$\frac{P_f}{P_{\text{met}}}=\frac{M^{\frac{7}{6}}}{M^{\frac{3}{4}}}=M^{0.42} \tag{4.13}$$

事实上，如果根据实验数据画对数图像，其斜率约为 0.35，较为接近我们的估计值。无论精确的比值应该是多少，可以肯定的是：随着质量的增加，飞行所需功率上升的幅度，要远远快于代谢率上升的幅度。这就是巨大飞行生物无法存在的真正原因。潘崔克估计，鸟类体重的上限，应该在 15～20kg 之间，这个数字接近于南加利福尼亚秃鹰的平均体重。它们是北美地区最大的鸟类。对更大的动物来说，飞行所需的功率过大，已无法实现。

这样一来，神话故事里的一大票飞行家全成了胡扯，巨龙、鹰头飞马、两脚飞龙之类，都将被证明无法存在，因为它们的代谢系统无法提供足够的功率来满足飞行要求。也许正因为如此，《哈利·波特与混血王子》中才写道：韦斯莱先生最大的愿望，就是搞清楚飞机为什么不会从天上掉下来[205]。这也貌似能够证明，类似于人类的飞行“霸主”这类外星种族同样不可能存在。尽管人类可以利用超轻体飞机或滑翔翼飞上天空，但这类飞行器的翼展（通常 5m 左右）要比人类的身躯大得多，而且升空的过程极其麻烦。或者要使用自行车式的拖曳装置，或者要爬上山顶，或者要用其他飞机拖上天空，等等。

在关于耶斯里安外星人的系列短篇小说中，波尔·安德森想到过一种绕开上述约束的好办法。这些会飞的智能外星人身体总质量为 20～30kg。为了突破质量约束，作者为它们设置了非常高的代谢率。它们是严格的肉食动物，而且有一套额外的消化系统，以提高代谢效率。尽管如此，它们仍旧面临着如何适应环境的问题。它们故乡的人口规模很小，因为每个家庭都需要相隔 20mile 左右进行狩猎，才能满足它们的巨大胃口。在人类到达该星球以前，它们的文明始终徘徊在铜器时代。原因在于人口密度过低，这大大限制了城市的发展，甚至令他们连蓄养牲畜都没能学会[23]。[A]

我小的时候有一本休闲小画书，名字好像是《龙来了!》。书的作者试图给龙的飞行能力一个合理的解释，他把龙解释为巨型的软式飞艇。书里说，龙的消化系统中可以产生大量的……嗯，臭屁（主要成分为甲烷和其他气体），这些气体会给它提供升力。它们喷火的时候呢，就是把体内积聚的甲烷释放出一部分而已。这个说法很新鲜，但我当时完全想不出这是否行得通。应该有一些原因，导致书中的途径不可能实现，因为我想不出任何现实世界中的动物，实际采用这样的飞行方式。我把这个例子留作课后练习，让读者自己去思考相关的细节。

### 4.4.2 猫头鹰邮递员

“哈利·波特”世界中最常见的场景之一，就是猫头鹰送信。以至于莱夫·格罗斯曼①小说《魔法师》中的一位角色，对此还出言讽刺。暂且不去管猫头鹰能不能被训练成邮递员，我们先看另一个有趣的问题：“猫邮”包裹的最大重量可以是多少（只考虑一位猫头鹰送信的情况）。[B]

任何读过 T. H. 怀特②先生作品《过去与未来之王》的读者都知道：猫头鹰以鼠类为食，并可以用爪子抓住或者尖嘴叼住老鼠飞行。所以说，一只老鼠的质量（约 50g），可以作为承重下限。试图用严格的公式来确定其负重上限，很可能会徒劳无功。所以，我们打算把它能捕捉的最大猎物质量，作为承重上限。因为海德薇是只雪鸮，我们就假设所有猫头鹰邮递员都是雪鸮。这些大块头体重可以达到 3kg，有时候会猎取野兔。而野兔的体重有时能达到 1kg。这样说来，让猫头鹰送快递，也不是个非常疯狂的主意。

那么投递速度会怎样呢？在《哈利·波特与火焰杯》中，哈利的猫头鹰海德薇给逃亡中的小天狼星布莱克送过信。书中暗示，布莱克躲在热带地区的某处。我将假设，他温暖的避难所至少会远离冰冷的英格兰 1000km。猫头鹰的飞行速度大约为 5m/s，折合 18km/h。为了简化计算，就当它每小时能飞 20km，1000km 就需要 50h 的飞行时间。假设猫头鹰每天飞行 8h，就将需要 6 天时间到达布莱克那里，6 天时间返回。这与书中写到的书信来往周期大略一致。所以，恭喜罗琳女士，在作品现实性方面得到一分。

### 4.4.3 上帝创造了功率，而人类创造了发动机

本章的主要话题，就是动物的行为需要受到动力产生机制的约束。作为动物的人类，身体仅能产生几百瓦的动力，而其中只有少部分能做有用功。奇幻小说中常见的仅依靠人力与畜力的社会，与工业社会相比，要更多地受到各类现实条

---

① 莱夫·格罗斯曼（Lev Grossmann，1971—　）美国当代著名小说家、记者，《时代》杂志的资深作者及书评人。

② T. H. 怀特（Terence Hanbury White，1906—1964），英国作家。

件的约束。也许，奇幻与科幻小说的最本质区别，就是他们所刻画的社会性质。在奇幻小说中，魔法就是技术的替代品，人们以此控制“强大的力量”，但又无须借助机器。而在科幻小说中，人们通过使用机器来获得强大的力量。

**注：**

A. 在研究生物学与物理学对科幻小说的影响与约束方面，安德森堪称大师。他还拥有丰富的历史和社会学知识，这都对他的作品起到了积极的影响。正是他的文章《造星指南》，激发了我编写本书的热情。

B. 另外提一句，为什么“哈利·波特”系列小说中的人物要用鹅毛笔在羊皮纸上写字呢？自己试试就知道了，这样做难度很大。从一根羽毛上削出笔尖，这可是门技术活儿。削好之后写字的难度，也不比准备工作小。从鹅毛笔到现代书写设备，其间至少隔了三次技术革命，或许更多。而且，用羊皮纸代替普通纸张，这成本可不是一般的高。

第二部分

# 星际旅行

# 第 5 章

# 技术革新：汽车为何跟不上计算机

## 5.1 未来世界的交通

本书第二部分讨论太空旅行，而且主要是载人太空旅行。在所有科幻小说中，载人航天器对外行星的考察，可能是最为常见的主题了。唯一能与之相提并论的，应该是接触外星人的故事。这种形式的作品与西部冒险小说的近似之处，已经有很多人探讨过，我就不再赘述。太空旅行总是与太空殖民紧密相关，又与18—19 世纪欧洲人在美洲和非洲的殖民活动不无相似之处。直到今天，太空殖民仍旧是科幻小说中常见的主题。tvtropes. org 网站将 2009 年的电影《阿凡达》称为“太空版《风中奇缘》”，的确不无道理[15]。

但是，如果回顾一下 20 世纪 50 年代以来的科幻小说就会发现，现实并未满足科幻作品中的预言。罗伯特·海因莱因在《更广阔的宇宙》中写道：太空殖民不可避免，就像日出东方一样必然[121]。他还在同一部作品中预言：到 2000 年，裸体主义将被广泛接受、随处可见，我们每个人都将拥有会飞的汽车和自动化的居室。声明一下，我可没有嘲笑海因莱因大师的意思哦。嗯，就算小小挖苦了一下，也是满怀敬意的挖苦。我觉得，科幻名家们对于未来的预测，应该比学者们好不了多少，这已经算不错了，尤其是考虑到大部分科幻作家，包括“硬科幻”作家，都不是实际从事科研工作的专家。预测未来，本来就是一件出力不讨好的事情。

尽管科幻作家往往不是职业科学家，却常常是才华横溢的科学爱好者，并常常拥有科学领域的较高学历。例如艾萨克·阿西莫夫是生物化学博士，尽管没有

做过任何相关领域的研究项目；拉里·尼文是数学学士；格里高利·本福德[①]是加州大学埃尔文学院的物理学教授，但他应该算是个例外。我可以很有把握地说，这些作者对有些研究领域的了解，大大超越了很多专业研究人员。他们是科学爱好者，意味着他们对一些研究领域有着特别浓厚的兴趣。同时，他们把这当作有趣的游戏，这就意味着，为了写个好故事，他们时而会在作品中故意添加一些不符合科学原则的成分。比如，罗伯特·海因莱因的青少年科幻小说《红色星球》，就把故事背景设置为有人居住的火星，上面空气稀薄，但可以供人类呼吸。即便在该书出版的 1949 年，人们也已经知道：火星空气能供人类直接呼吸的可能性小之又小。事实上，早在 1918 年，科学家就已经指出这一点。不过，为了讲一段精彩的故事，让火星上有人类居民，还是比只有机器人更有趣。

回到载人太空旅行的问题上：我们想实现载人航天，并建立太空殖民地，本来就有充足的动力。不过，科幻小说中给出的理由，往往是从经济角度考虑的。其中往往会说，有些产业在太空运作更加有利可图。我们或者可以在月球采矿，或者在小行星带及其他星球种植庄稼。在讲述物理和化学知识背景的同时，我打算深入地考察一下载人航天与太空殖民地的经济收益问题。

载人航天的另外一重动机就是军事。从 20 世纪 60 至 80 年代，这类观点极为盛行。当时美国政府的战略防御计划被俗称为“星球大战计划”，被人们看作是现实可行的太空防御方案。这个俗称，当然来自 1977 年大热的电影《星球大战》（现在被称为“系列之四”）。其中的太空站被展现为第二次世界大战时期空战的风貌。乔治·卢卡斯在太空布景下重演了中途岛之战，但真正可能发生的太空战，将完全是另外一副样子。

最后一种动机，听上去更高尚一点：为了人类的生存与延续。在文学作品中，这一主题以各种不同的面貌出现过。有时候，人类幸存者离开地球，是为了躲避某种灾难，比如核战争或生态灾难等。雷·布拉德伯里《火星编年史》的最后一个故事，以及拉里·尼文和布伦达·库珀的小说《建造丑星之月》，都属于这种类型。有时候，书中的灾难会更严重也更壮观，比如奥拉夫·斯塔普尔顿《最后的人和最初的人》，书中的人类要搬去金星。因为月亮从天上掉下来了[225]。有时候，故事中的人类只是要找一个新的落脚点，以防地球发生不测。很多科幻故事都是以此

---

① 格里高利·本福德（Gregory Benford，1941— ）是著名的物理学家和天文学家，从事天文物理和等离子物理领域里的理论和实验研究。也是现代最优秀的硬科幻作家之一。

为基调展开的。人类的确面临多种现实威胁，可能会无法继续在地球上生存，因而这些设想的确也有值得探讨的价值。

当我们面对星际旅行话题时，一再重复出现的主题就是能量和成本。两者又紧密相关，尽管关联程度并不像人们第一印象中的那样紧密。要发射火箭或其他航天器到达外星球，需要耗费大量能量，甚至连进入地球同步轨道也代价不菲。这当然要花很多钱。本章的主要观点可以用一句话概括：从能量消耗角度来看，完成计算比运送物品的成本要低得多，而这一点，正是人类到现在仍未建成有人居住的月球基地的原因。

## 5.2 星际旅行的真相

阿瑟·克拉克曾在非小说作品《太空远景》中写道，对星际旅行的先行者如齐奥尔科夫斯基、戈达德和奥伯斯等人而言，“当今载人与无人航天技术之间的争执，会显得……像中世纪神学家之间的争论一样无聊”[55]。他的言外之意，是说载人与无人航天技术势必将共同发展，无人探测活动先行，且有利于计划规模更大的载人项目。克拉克指出，从戈达德留下的笔记，以及齐奥尔科夫斯基和奥伯斯的文章中都可以得出明确的结论，即“人类将成为火箭带入空中的最重要载荷”。但是，自1968年该书出版以来，世界已经发生了很多变化。甚至从1985年，我那本破旧的第二版出版以来，也发生过许多巨变。

事实上，除了在大众传媒世界之外，无人探测项目已经成了空间科学考察活动的主流。尽管直到2012年被终止之前，航天飞机一直占到美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration，NASA)经费的大部分。但其对于科学研究的实际贡献，却远不如那些无人探测项目，比如火星车、“伽利略”号卫星对木星的探测，“惠更斯”号探测土星。几乎任何一个叫得出名字的无人项目，科学意义上都比航天飞机重要。航天飞机完成的唯一有意义的工作，似乎就是将哈勃空间望远镜送上轨道，后来又派人去维修，每次花费高达5亿美元。如果采用无人方式发射，这么多钱造十多台望远镜发射升空都够了。

不管是从科学还是社会角度看，臆想与现实之间的落差都很有趣。社会角度的分析，我还是留给别人去做吧。不过，本书这个部分前几章的不少篇幅，却会深入地分析载人航天项目的细节，以及为什么无人探测成了当前的主流，在过去50

年间取得了那么多成就。我们会细细考察相关情况，这个步骤本身也提示了基础物理学中有趣的对比：太空航行要耗费大量能源，而相关计算却几乎不用任何成本。1968年，克拉克创作他那部作品时，计算机还是用打孔卡片编程的庞然大物，没有任何科幻作家预见到计算机能够缩小数百万倍，计算速度能够实现现在这样的提升——而在当下，人们距离计算速度的极限还非常遥远。由于CCD技术、X光与伽马射线望远镜等技术的进步，现在我们能在人造卫星上搭载的设备数量呈指数级增长。计算机可以微缩化，仅需要极少的能量，而且既不用呼吸也不用进食。相比之下，人类块头那么大，在宇宙空间里又需要那么多设备才能存活。此外，计算机完成使命之后可以无须回收。我们先不考虑复杂的宇宙飞船，先从更常见且熟悉的对象说起。我们目前以汽车为主的交通运输系统，跟计算机相比能耗就非常高。

## 5.3 计算过程的能量需求

听过一个段子，大致是这样说的：如果过去40年间，汽车技术的进步与计算机一样，那么我们现在的汽车，应该能折叠放入衣袋，打开后能乘坐百人，只要一滴油，就能以1000mile/h的速度环绕地球一周。上述设定显然有些自相矛盾之处，咱们姑妄听之。

用基础物理学原理就可以解释，为什么计算机技术突飞猛进，而汽车却无法以类似的速度革新。正如罗伯特·费曼所说，作为计算机技术基础的硬件，还有非常巨大的潜力可挖。计算机最为基本的操作，就是把一个比特的数位反转。数位的状态可以用数字0或者1来表示，用于进行二进制计算。对此有兴趣的读者，可以参考保罗·纳辛①的著作《逻辑学家与工程师》[173]。最早的原型计算机，就已经开始采用某种方式来表示数位。计算函数的过程中，每个位置的数字要么保持不变，要么就要被擦掉重写。

物理学家鲁尔夫·兰道尔证明了，擦去一比特数据所需能量的最小值等于$kT\ln 2$，其中的$T$表示温度（开尔文温度），$k$代表玻尔兹曼常数（$1.38\times10^{-23}$ J/K）[143]。在室

① 保罗·纳辛（Paul Nahin，1940— ），美国数学家和物理学家，出版过十余部科普作品和若干短篇科幻小说。

温条件下，计算结果仅为每次 $10^{-21}$J 左右。有的物理学家甚至猜想，将来可能会出现完全无须耗能的计算方式，但目前，我们暂且假定上述公式中的最小能量需求是必要的。^基础物理学还可以帮助我们得出每比特数据重写(0 改为 1，或 1 改为 0)所需的最小时间间隔为

$$\tau = \frac{h}{E}$$

其中，$E$ 是擦写一比特数据所需的能量，$h$ 是普朗克常数($6.626\times10^{-34}$J·s)。理论上讲，如果我们能够实现最低能耗，就可以利用其倒数算出最大计算速度，即每秒 $10^{13}$ 次数位转换，也就是比目前的处理器更快 4 个数量级。当然，硅的自然属性已经开始拖累技术进步，有时甚至使其陷入停滞，但基本的极限状态就是这样。这种终极计算机的能耗，就是用单位能耗乘以计算速度：

$$P = kt\ln2\times\frac{kT}{h} = \frac{(kT)^2\ln2}{h}\approx10^{-7}\,\mathrm{W} \tag{5.1}$$

这个极限同样可能是无法达到的，但的确可以说明为什么计算机技术的进步能够如此神速：我们距离性能改善的极限还非常遥远。但汽车的情况又是怎样呢？

## 5.4　普通汽车与飞行车的能耗分析

在这一小节的开头，让我们先提出一个看起来很傻的问题：汽车为什么需要发动机。这的确很傻，因为汽车没有发动机的话，根本就寸步难行。但如果想想牛顿第一运动定律，这个问题就没有最初显现的那样傻了。(不受外力影响的条件下，)运动物体会继续保持运动状态。汽车或许需要发动机来启动，可是一旦启动完成进入运动状态，为什么不会永远继续保持运动状态呢？

这一问题的答案，也正是亚里士多德物理学能够深入人心的原因。如果汽车没有承受任何外力，它当然可以一直沿直线运动下去。但汽车运动过程中，其实一直都受到各种阻力的影响，导致其速度下降。其中两种阻力，就是轮胎与地面之间的摩擦力和空气对车体的阻力。但是，这些并没有导致最大部分的能量浪费，问题最主要还在发动机本身。发动机提供的相当一部分能量，都被活塞用来克服大气压，或者损失在发动机到车轮之间的传动系统中。除去这些之外，还有物理学施加给汽车的终极约束。人类最早建造发动机的时代，能量的概念还没有

获得充分的理解。焦耳关于功热转换的论文发表于1844年，比瓦特设计的蒸汽机获得商业成功整整晚了80年。焦耳和其他人的文章，共同催生了热力学第一定律：

> 一个封闭系统中的能量，可以从一种形式转化为另一种形式，但无法被创造或毁灭。

这就是所谓的能量守恒定律。世界上有各种形式的能量，但这里我们所主要关心的，是化学能做功转化为机械能的过程。1kg汽油燃烧，可以释放出45 000kJ能量。理论上讲，这些能量足够把一辆重1000kg的汽车举起到4500m的高度。这就是为什么工业革命以来人们生活越来越轻松的原因，发动机能做的功比任何个人都强大几百倍。

但在现实中，我们需要考虑的因素远不止是能量守恒。汽油燃烧得到的能量，不可能全部都做有用功。一部分能量肯定会被浪费掉，转化为无用的热能或其他形式的能量，散入周围环境中，无法再被回收。比如说，一块小小的冰块中，也蕴藏着数量可观的能量。如果冰块质量为36g，其中就将包括12亿亿亿个原子($12\times10^{24}$)，每个原子都蕴涵3kT的随机热能(3kT的数字，来自于对该系统更为深入复杂的分析)。整个冰块中的能量总额，可以用下面的计算得出：

$$E = 3\times12\times10^{24}\text{ 个原子}\times300\text{K}\times1.38\times10^{-23}\text{J/K}\approx150\,000\text{J}$$

这数量还是很可观的，折合5000kJ/kg之多。1kg的冰块所包含的热量，就与一个人一整天所做的功相当。那么，让我们解读一下整个世界的能源问题：简单拿起一块冰，或者随便什么其他东西，只要提取其中的热能来驱动我们的机器就行了。酷！

不过，这个词儿也能点出前文计划的问题所在：酷(冷)。冰块温度低于汽车发动机。我们在第2章“哈利·波特与守恒律”就曾谈到这个问题，当时立论的背景不同，不过这里依然值得再次强调：如果我们取一块冰放到汽车发动机上，冰块中的热量并不会传给发动机，而是恰恰相反。我们发现热能形式的能量从发动机传导到冰块上，使之升温并融化，同时使得发动机降温。这就是热力学第二定律的内容：

> 热能总是自动由高温物体传向低温物体，而不是相反。

这一定律的另外一种表达形式就是：

为了让热能从低温物体向高温物体传导，就必须要做功。

如果能量从冰块向发动机传输，就将进一步降低冰块温度，提高发动机温度，这是不可能自动发生的事情。如果你想要这样的局面出现，就必须要做功。换言之，你不可能无中生有。

热力学第二定律使所有发动机效率都面临严格的约束。发动机的每个冲程，都是从某种化学反应中汲取能量，然后从温度较高的“能量储集地”向较低温部分传导的过程。在此过程中，一部分热量被用于做有意义的工作，也就是说被转化为功。比如，在汽车发动机的奥托循环过程中，汽油与空气的化学反应产生热量，反应使活塞升温，因其中空气加热而运动。等到活塞回到原位时，将反应产生的废气降温后排出至周围的空气中。尾气中仍有部分热量，但已经不能用于推动活塞做功。发动机的效率，可以用有用功除以总功得到，这个数字有一个严格难以突破的上限：

$$e \leqslant 1 - \frac{T_C}{T_H} \tag{5.2}$$

其中的 $T_H$ 是反应过程中能够达到的最高温度，而 $T_C$ 是最低温度。通常来讲，最低温度都是室温，而汽车发动机的最高温度，在 500K 左右，也就是说，汽车发动机效率的上限就是 1—(300/500)＝0.4，或者说 40%。这还只是理论上限，实际达到的数字通常比这还低，仅有 20%左右。简单总结一下：计算机目前的效率，仅相当于最高效率的十万亿分之一，所以才能实现跳跃式的改进。而汽车发动机的效率，只要提高两倍就已经接近理论极限，所以它们的改善才会这么难。

这一点非常重要。最早的蒸汽机效率仅有不到 20%，但提升非常迅速，几乎是指数式增加，直到接近于其理论极限。现在，想要进一步提升内燃机效率，就需要做非常多的工作。当前的研究重点，好像是油电混合动力发动机。但也有人致力于研发新材料，以便让发动机承受更高的反应温度。

让汽车飞起来的主意怎么样？毕竟，科幻小说里可是到处都有会飞的汽车，从雨果·根斯巴克时代就开始了。这时候，就会面临一个语义方面的困惑，许多小型飞机，并不比较大的汽车大多少。如果我们给汽车加装了翅膀，得到的到底是汽车呢？还是小型飞机？还有，气垫船能否算作飞行车？尽管它们仅能离地几英尺？无论如何，姑且假设，我们手上有一辆詹姆斯·邦德式的梦幻汽车，上面还有一对可以折叠的翅膀：我们能实现的最高水平怎样？嗯，翅膀上的气流，当然是帮助汽车升空不可或缺的组件，但也会增加车身阻力。我们在计算增加的部分阻

力时，可以假设其数值占升力的一部分，比如20%。升力与汽车重量相等。如果假设小型汽车的质量是1000kg，其所受重力约为10 000N，翅膀承受的阻力为2000N。如果汽车行驶速度为60mile/h（这么低的速度可能还不足以令它保持腾空状态），为克服空气阻力所需的功率为

$$P = Fv \tag{5.3}$$

其中的$P$是功率消耗，$F$是阻力，$v$是汽车的速度，当前假设情形下为大约30m/s。算出克服阻力所需的功率为60 000W。但是，由于汽车发动机转化热能的效率仅有20%，就需要高达300 000W的功率，才能让汽车腾空飞行。这消耗还是很大的，发动机功率要高达400马力[①]，比2010款的丰田卡罗拉高三倍。（卡罗拉的质量都不止1000kg，飞行车需要更大的发动机，质量势必还要进一步增加。）所以说，飞行车并非不可能制造，但养车成本会非常高，而且也很危险。普通汽车如果耗尽了燃油，靠边停车就行了。飞行车突然没油的情况……想想都会觉得可怕。此外，学习驾驶飞行车，肯定要比普通汽车更难，空中撞车的风险，也会比地面碰碰车更大；如果高速路上车来车往，肯定也不那么容易“迫降”。我觉得，你肯定还能想到飞行车的其他不便之处。

当然，大部分科幻小说中的“飞行的士”，并不是被描绘成小型飞机的样子。它们的外形通常更炫更酷，飞行成本也更高。在罗伯特·海因莱因作品《野兽数字》中，主角就有一辆飞车，可以被发射到低空同步轨道中[120]。海因莱因曾预言（1979年），在不久的将来（2010年左右），人类日常出行的时速就将达到数千英里。遗憾的是，到现在都没有应验。不过这样的出行方式，已经与太空旅行接近，所以我们将细细探讨一番。

## 5.5 低空轨道飞行

下章将讨论太空度假。本章的剩余部分篇幅，将专门探讨海因莱因笔下的“飞车”。其实他的飞车，可以说就是一颗披着车壳的弹道导弹。具体讲，是一颗载人、可操控的弹道导弹。就其本质而言，跟以前美苏两国用来威胁对方的核武

---

① 1米制马力=735瓦特。

器运载工具完全一样。那么，弹道导弹的运作原理又是怎样呢？

很粗略地讲，通过抛物线计算公式，就可以理解弹道导弹的最基本原理。这大约是中学生物理课开学之后两三周就会讲的内容。简单讲，假如你以一定的初速度，沿着与地面成一定夹角的方向将球抛向空中，抛物线公式可以帮你计算球能被扔出多远。

这里有两个需要提醒的要点：

- 公式中没有考虑空气阻力问题；
- 公式假设抛物点周围的地面是平的。

这两个限制条件将会影响我讲述内容的可靠性：弹道导弹飞行的距离非常遥远，所以在计算其运行轨迹过程中，客观上需要考虑地球表面的弧度；此外，至少是在发射和落地阶段，弹道导弹要穿过大气层，所以任何贴近现实的计算都应该考虑空气阻力的影响。但是其基本原理的确非常简单：你把“飞车”扔到高空中，由于受重力影响，它将沿着接近于抛物线的轨迹飞行并最终返回地面。

公式如下：

$$R=\frac{v^2}{g}\sin 2\theta \tag{5.4}$$

其中的 $v$ 是发射起始速度，$g$ 是重力加速度（地球表面的数值约为 $10\mathrm{m/s^2}$），$\theta$ 是物体发射方向与水平面的夹角。飞行时间也可以据此解出

$$t=\frac{R}{v\cos\theta}=\frac{2v\sin\theta}{g} \tag{5.5}$$

当发射角为 45°时，最终飞行距离 $R$ 取得最大值。表 5.1 中显示了我们的飞车飞行特定距离需要达到的最小起始速度。

表 5.1 中第三列的数据，是精确到分钟的飞行总时间（根据速度和飞行距离计算得出）。计算结果不错，我们能在不到 10min 时间内飞行 1000km。需要注意的问题之一是：一旦飞行距离远远超过 1000km，这里的算式用处就不大了，因为这时已经需要考虑地球表面的弧度。例如，用上述公式计算飞行 10 000km 所需的起始速度，得出结果是 10 000m/s，而这大大高于发射飞车实际需要的初速度。这种情况下，我们就是在进行同步轨道飞行，这是下章将探讨的话题。计算飞车势能时，我们仍假设其质量为 1000kg，这可能大大低于实际需要的质量。不过大致能够说明问题。

表 5.1　不同初速度下的弹射距离

| 距离/km | 速度/(m/s) | 飞行时间/min | 动能/J |
|---|---|---|---|
| 1 | 100 | 0.24 | $5\times10^6$ |
| 10 | 320 | 0.74 | $5\times10^7$ |
| 100 | 1000 | 2.36 | $5\times10^8$ |
| 1000 | 3200 | 7.37 | $5\times10^9$ |

燃料成本过高是这一计划的致命软肋，至少远距离飞行会面临此类问题。在特定的合理假设情形下，飞行 1000km 将至少需要价值数千美元的燃料。而且我们还忽视了非常现实的工程学问题，比如：你怎么能把人装进这样简单的铁罐子里丢上天，再掉下来，还指望里面的人活命？要解决这一难题，就需要花费更多燃料，所以说，短期内我们都不可能亲眼看到“弹道飞车”。

**注：**

A. 可逆计算理论过于复杂，超出了本书能够讨论的范围。想知道计算为什么可以完全不消耗能量的理论基础，可以参看《费曼计算理论教程》，那里的讲解非常简单易懂。[见原书第 82 页，“可逆计算理论与计算的热力学原理”]

# 第 6 章

# 太空度假

## 6.1 科幻小说中的未来：太空假期便捷又便宜

> 上面的猜想，对仍在关注目前动辄花费天文数字经费的航天项目的人而言，当然显得荒谬。但在未来数十年中，太空旅行的费用和难度都将大幅下降。
>
> ——阿瑟·克拉克 《太空远景》

在电影《2001：太空漫游》开头部分的一个场景中，海伍德·弗洛伊德博士曾经乘坐商用航天飞机（属于泛美公司）前往环地球空间站。电影中对此事司空见惯的态度表明，此类航行在 2001 年的世界里极为常见。同时，这也几乎是科幻电影中对太空航程的力学特征做出正确展现的孤例。克拉克在他 1968 年出版的名作中，申明的关于太空探险的立场，与电影中的观点相得益彰：在未来时代，太空旅行将简单而常见，就像现在的人们乘坐飞机一样。

这也正是所有科幻小说中最常见的主题。自从这一文学类型出现之日起，就几乎无处不在。从 1900 年到 1980 年间，基本上所有的科幻作者，都曾发表过有星际旅行内容的作品，其中甚至包括不以硬科幻风格知名的作者。下面这些知名科幻作品中的星际旅行，应该可以说明这一特色。

- 《从地球到月球》，作者儒勒·凡尔纳①。这并不是第一部讲到星际旅行的小说（凡尔纳之前还有齐亚诺·德·贝吉拉克和约翰·开普勒），从科学角度讲也远远称不上精确。书中的星际旅行者建造了一门大炮把自己射上天，事实上，这样的做法会把他们自己撞成肉酱[241]。
- 《登月第一人》，作者赫伯特·乔治·威尔斯②。这部作品在科学方面同样远非严谨：书中的凯渥教授发明了一种金属，可以让放在上面的任何物体免受重力影响。即便在当时，人们也知道这是不可能的，因为它违背热力学第一定律，如果这样的金属存在，就可以用它来制作永动机了。总之呢，故事里英勇无畏的英雄们用这种凯渥金属造了一艘宇宙飞船去了月球，还在那里遭遇了昆虫一样的塞利尼特人，后者生活在月球地面以下的洞穴里[249]。
- 《大发明家拉尔夫》，作者雨果·根斯巴克③。该书是美国硬科幻小说创作的先行者。太空旅行并不是全书重点，不过在故事结尾，同名主人翁去了外太空[91]。
- 《伽利略号火箭飞船》，作者罗伯特·海因莱因。海因莱因是黄金时代最优秀的科幻作者之一，本书成功地把精彩的故事情节和严谨的科学知识有机结合。书中的三名童子军和一名成人建造了一艘核动力宇宙飞船，比20世纪70年代的NERVA计划还要早。到现在，这本书依然值得一读，也是最早吸引我爱上科幻的作品之一。本书另一个值得研究之处，是体现了科幻作家乐于留意的方面（事实背后的科学原理），以及容易忽略的方面（此类计划必然牵扯的巨额成本和大量基础设施）。后面我们还会细说这一点[109]。
- 《火星编年史》，作者雷·布拉德伯里。对这本书中的故事而言，科学并不是重点。但对人类探索火星的努力而言，科学肯定是一切的核心[40]。
- 《尤比克》，作者菲利普·K.迪克④。这是一本情节怪诞的小说，大部分故事发生于人工建造的死灵世界。但是全书开头部分写到了一次登月旅行。

---

① 儒勒·凡尔纳(Jules Gabriel Verne，1828—1905)，法国小说家、科普作家，现代科幻小说的重要开创者之一。

② 赫伯特·乔治·威尔斯(Herbert George Wells，1866—1946)，英国著名小说家。他创作的科幻小说影响深远，开创了"时间旅行"、"外星人入侵"、"反乌托邦"等20世纪科幻小说中的主流话题。

③ 雨果·根斯巴克(Hugo Gernsback，1884—1967)，卢森堡裔美国发明家、作家、杂志出版商，出版的刊物包括美国第一本科幻小说杂志。对出版界的贡献巨大。年度科幻小说奖以他的名字命名为"雨果奖"。

④ 菲利普·K.迪克(Philip K. Dick，1928—1982)，美国科幻小说作家，著作很多，其中至少有十一部小说被改编成电影。知名作品包括《高堡奇人》、《警员说：流吧！我的眼泪》等。

像迪克的很多其他作品一样，这里的故事也发生于不久以后的地球。那时候，去往外太空的旅行就像今天的人们乘坐飞机一样普遍。尽管对于迪克的故事来讲，这类细节似乎都不重要。另外需要留意的一点是，《尤比克》这部作品中的"不久以后"，指的是 20 世纪 80 年代，现在看来已经是三十多年之前了[67]。

- 《神经漫游者》，作者威廉·吉布森①。常常被看作史上第一部赛博朋克小说，《神经漫游者》的故事背景非常符合早期科幻作品的标准设定。临近全书末尾的时候，主要人物动身前往地球同步轨道上有人居住的空间站。吉布森是个很特别的科幻作者，因为他的早期作品总是设定在这样合乎科幻常规的环境下；在晚期作品中，却又将这些设定全盘抛弃[95]。

我还可以举出几百个提到星际旅行的其他范例。从 1930 年到 1980 年间，整个科幻小说门类，就大致等同于太空旅行小说。至今，仍被人们与其紧密相连，尤其是在流行文化媒体，如电影、电视和其他文化媒介中。一个重要的事实是：即便在故事主体并不围绕星际旅行展开时，也会让星际旅行成为作品中世界的常态。在上面提到的作品中，《尤比克》和《神经漫游者》都可以完全不提星际旅行。只是在人们关于未来的幻想中，星际旅行是如此常见，以至于迪克和吉布森都毫不犹豫地把它写进了作品里。

有关太空旅行和火箭的科学细节最早出现于科幻小说中，时间是在 20 世纪 30—40 年代。这可能跟罗伯特·戈达德于 1919 年发表的长篇论文《超高空飞行方法》有关[98]。他并不是第一个对此进行严肃科学研究的人，俄罗斯的齐奥尔科夫斯基和德国的奥伯斯都比他要早。但他是第一个用英语出书，讨论火箭技术在太空旅行领域应用问题的人。在这篇论文中，他得出了一些重要的结论，包括我在正文中将会引用的"火箭方程"。20 世纪 20 年代，"不列颠星际学会"成立，也进一步激发了公众对于此类设想的研究热情。当时和后来一样，人们也普遍相信星际旅行的时代将很快到来。太空旅行，或至少是前往地球同步轨道的旅行，将会变得非常普遍。这些憧憬并未成为现实。尽管到了 20 世纪初，世界上真的出现了太空游客，但只有超级富豪才能负担得起。那么，这到底是为什么呢？为什么我们人类到现在还没有找到那双轻盈的翅膀，随随便便就飞上月球呢？

---

① 威廉·吉布森（William Gibson，1948— ）生于美国南卡罗来纳州，现居住在加拿大，主要写作科幻小说，被称作赛博朋克运动之父，代表作有《神经漫游者》等。

## 6.2 轨道飞行器

让我们首先来了解一个最便宜的太空旅行方式：地球低空轨道飞行。至今已经有七名游客通过“太空探险公司”——一家经营太空旅游项目的机构定购了同步轨道休闲游项目。2001 年的游客丹尼斯·提图，据说花费了 2000 万美元，才去了一趟国际空间站。这样的价位显然不适合普通人，但的确有人认为：这些行程是太空旅游产业的开端，以后的价格会不断下降，越来越多的游客将涉足太空。但是在过去十年间，这方面并没有什么明显的进展。

乍看上去，太空旅游产业面临的首要问题是能源瓶颈。要耗费大量能源，才能进入地球同步轨道。在当今社会，能源的价格还是非常昂贵的。所以，我们需要提出两个问题：

(1) 要升入太空，到底需要多少能源？这些能源又要花掉多少钱？

(2) 这到底是不是导致太空游价格惊人的主要原因？如果不是，那么还有哪些因素在产生影响？

## 6.3 任何太空行程的第一步：太空行的能量代价

一旦到达同步轨道，任何太空旅程就已经成功了一半。

——(疑似出自)罗伯特·海因莱因

有些人好像有一个误解，认为美国最新最大的航天飞机，有必要的时候就可以随时飞上月球。这种错误观念来自对阿波罗计划的一知半解，以及对空间世界广袤程度的无知。航天飞机的飞行轨道，通常仅高出地面 350km(折合约 200mile)，还不到华盛顿特区与纽约市之间距离的一半。而地球中心距离月球远达 38 万 km(折合约 23.8 万 mile)，比航天飞机最高飞行线路高 1000 倍左右。如果地球缩小得像篮球那么大，航天飞机的轨道仅高出其表面半英寸[①]，而月球将像

① 1 英寸＝2.54 厘米。

乒乓球那么大，距离在30ft以外。

既然低空轨道离地面这么近，为什么把航天器送入轨道还会这么难呢？普通人毕竟用不到什么发射装置，也能轻易从华盛顿到达纽约。这可能是因为，你要竖直向上200mile，而不是水平移动同样的距离。这是答案的一部分，但不是全部。最大问题来自"轨道"。如果只是简单地把一件物品向上运送200mile，所需能量要比送入低空轨道低不少。根据我的计算，区别能达到四分之一。不过，随随便便送上天空的东西，会很快掉落回地面上，因为在到达低空轨道之后。它没有获得足以停留在轨道上的速度。

### 6.3.1 何物向天飞

地球表面的人之所以不会穿透地面掉进地底，是因为地面坚硬。地面对我们的脚掌施加一道支撑力，与向下的地心引力互相抵消。飞机之所以不掉落，是因为机翼周围的气流产生的升力。但是，航天飞机是如何停留在空中的呢？它的确有机翼，但那仅仅是任务收尾阶段降落时用的。在太空中，没有人会听到你的尖叫，因为周围没有空气。在没有空气的地方，也就没有了能让飞行器停留在空中的气流升力。

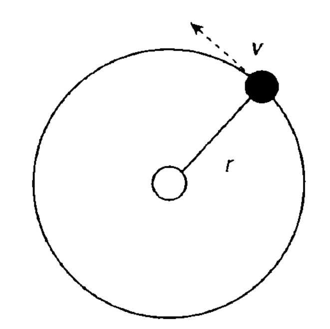



图6.1 拴在绳子上的石头，以速度 $v$ 围绕着半径为 $r$ 的圆作圆周运动

最有趣的事实就是：没有任何力量让航天飞机不下坠。事实上，它就是在持续地向地面跌落，但却总是会错过目标。航天飞机在同步轨道的飞行线路接近于正圆：我们可以把这条轨道上的物品，看作是小孩子在头顶转圈甩动的一块用绳子拴紧的石头。如果绳子断了，石头就会沿着与绳索垂直的方向快速飞走。这是因为它受到牛顿第一运动定律影响：没有受外力的物体，将保持静止或匀速直线运动状态。飞走的石头沿着绳子断掉之前它运动的方向直线飞走。（图6.1画出了石头运行的线路。）但是，在绳子没有断裂的时候，其牵引力却让石头只能沿着圆圈飞行。轨道上的航天飞机就像那块石头，而约束它的"绳子"，就是它与地球之间存在的引力。

如果任何物体（比如航天飞机、绳子拴紧的石头、正在转弯的汽车）以速度 $v$

作圆周运动，它就必须受到一个指向运动圆心的牵引力，力的大小可以用以下公式算出：

$$F=\frac{Mv^2}{r} \tag{6.1}$$

其中的 $M$ 是物体的质量，$r$ 是圆周半径。在此，牵引力的大小可以是任意数值，只要其方向正确（物理学上称为“向心力”）。航天飞机承受的力量是地心引力，并可以用以下算式得出：

$$F=\frac{GMm}{r^2} \tag{6.2}$$

这里的 $G$ 是一个通用的引力常量（公制单位数值为 $6.67\times10^{-11}\text{N}\cdot\text{m/kg}^2$）。$M$ 是地球的质量（$5.98\times10^{24}$kg）。$r$ 是航天飞机到地心的距离，数值上等于地球的半径加上航天飞机的高度（结果是 $6.8\times10^6$m）。我们可以联立上述两个方程，解出能够让航天飞机停留在轨道上的速度：

$$v_{\text{orbit}}=\sqrt{\frac{GM}{r}} \tag{6.3}$$

此处应注意，速度数值与航天飞机的质量无关。代入各已知数据后计算，得知 $v_{\text{orbit}}=7600$m/s(7.6km/s，高达 17 000mile/h)。如果慢于这一速度，它就会摔落到地面上。如果速度更快，则起初会导致非圆形运动轨迹，最终结果是飞行器一去不复返。

将航天飞机送入轨道的最大难点，并不是让它攀升到足够高度，而是让它获取足够的速度。航天飞机的载荷为 100 000kg（约 100t），任何以速度 $v$ 移动的物体具备的动能是

$$k=\frac{1}{2}Mv^2 \tag{6.4}$$

利用这一公式，得出航天飞机的动能为 $3\times10^{12}$J，或 300MJ（焦）。每加仑汽油含有的热量约为 100MJ，也就是说，上述动能需要消耗 30 000gal（加仑）[①]汽油。美国汽油售价约为每加仑 3.50 美元，我们可以算出相应动能对应的汽油成本为 105 000 美元。但是，这还远远不是全部。

① 1gal＝3.785L（美制）；1gal＝4.546L（英制）。

### 6.3.2 火箭方程式

复杂之处在于，火箭需要燃烧大量油料来达到上面提到的速度，其需求规模非常可观。燃料本身的质量，常常会超过任何火箭的有效载荷。比如，航天飞机加火箭推进器加燃料箱的质量，约为 2 000 000kg，或者说是有效载荷的十倍。究其原因，就是在你使用燃料推进航天器的同时，也不得不把燃料送上天空。火箭的工作原理本身非常简单，主要跟牛顿第三定律有关：任何力都有反作用力，大小相等，方向相反。打个比方，假如你和你的小妹妹一起站在平滑的冰面上。你的体重是 80kg，而她的体重是 40kg。她老是缠着你，于是你推了她一把，使她朝着远离你的方向以 4m/s 的速度向右侧滑开，这时你会发现，自己也在以 2m/s 的速度向左侧滑开。因为你对她发力，想把她推开，所以她也自动向你施加反作用力，其大小完全相等，方向恰恰相反。因为你的体重比她大，所以你移动的速度比她慢，但还是会移动。这就是火箭的工作原理：火箭上的发动机消耗油料，油料燃烧释放出的能量，使反应产生的气体高速喷出，发动机的设计方式，决定了它将把快速移动的气体“向后”喷。由于反作用力原理，飞船同时就会受到向前的推动力。衡量燃料废气喷出速度的变量记作 $u$，数值通常为每秒钟数千米。它是废气从火箭末尾喷出的速度。推动力（驱使火箭向前飞行的力量），就等于废气喷出速度乘以燃料燃烧的速度，后者记为 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$。根据牛顿第二运动定律，我们还可以得出另外一个方程，其中包含火箭速度变量 $v$：

$$m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=u\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} \tag{6.5}$$

其中的 $m$ 是火箭的燃料质量加上有效载荷质量，而 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$ 是任一时间点上燃料消耗的速度。这里需要强调两点：

(1) 火箭的加速度并非恒定值，因为其质量在不断变化（质量随燃料消耗而减轻）。

(2) 当前我们忽视了地心引力对火箭速度的影响。事实上，达到特定速度所需的燃料数量，要比我们这里计算得出的结果更多。不过，在航天飞机的问题上，数值的差异相对较小。

现在，只要运用基础的微积分知识，就能解出这个方程式。假设火箭起始速度为零，最终将达到的速度为 $v_f$，我们就可以得出：

$$v_f=u\ln\left(1+\frac{m_f}{m_r}\right) \tag{6.6}$$

其中，$m_f$ 是燃料总质量，$m_r$ 是火箭不包括燃料在内的质量。这就是著名的火箭公式，应该被任何敬业的科幻作者熟记于心（说起来，真正的科幻粉丝也应该记住）。航天飞机配套的火箭推进器，废气喷出的速度约为 2600m/s。表 6.1 给出了燃料质量与火箭自重比例不同的情况下，能够达到的最终速度。

**表 6.1　火箭最终速度与燃料质量比之间的关系**

| $m_f/m_r$ | 最终速度/(m/s)* | $m_f/m_r$ | 最终速度/(m/s)* |
|---|---|---|---|
| 0.1 | 248 | 20 | 7915† |
| 0.3 | 682 | 30 | 8958 |
| 1 | 1802 | 50 | 10 222 |
| 3 | 3604 | 100 | 12 000 |
| 10 | 6234 | | |

* 燃料废气喷出速度 $u=2600$m/s

† 地球同步轨道速度的近似值

请注意，如果还有更多燃料，火箭飞行的速度可以比废气喷出的速度更快。根据火箭公式计算得出，要达到同步轨道速度，燃料与载荷的质量比需要达到 20∶1。这个估计还是很准确的，火箭发射时的总质量的确就是 200 万 kg，或者说约为低空轨道航天器质量的 20 倍。我们计算的结果略有差异，是因为假设火箭只有一个冲程，一次持续烧完所有燃料，而事实上，航天飞机升空时，推进器有三级推进系统（燃料分三次燃烧）。[A]

对火箭学而言，另外还有两个重要的概念：

- 比冲（$I_{sp}$）：其实就是喷气速度 $u$ 的另外一种较为隐蔽的表达形式。$I_{sp}=u/g$，其中的 $g$ 代表重力加速度。我不明白为什么火箭科学家们不干脆用 $u$ 了事。不过目前的现实就是这样。
- 推动力（$T$）：推动火箭前进的净力，可以利用下列公式计算得出：

$$T = u\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}$$

这本质上也是一个描述材料特性的参数，由你所选用的燃料类型决定。可以利用上述两个参数描述火箭特性。有些火箭推动力大但比冲小，例如化学推进剂。另外一些火箭推动力小但比冲大，比如离子推进器。或者推动力与比冲都大，比如猎户座飞船的推进器。对太空旅行而言，推动力与比冲都小的火箭是没有用的。人只会讨论高推动力的火箭，因为只有它们才能被用于从地球向同步轨

道运送物资。

烧掉的燃料总动能为

$$K_{\text{fuel}}=\frac{1}{2}m_f u^2 \tag{6.7}$$

假定燃料载荷比为 20。那么就可以算出燃料提供的动能为 $7\times10^{12}$ J，或者说初始估计值的 2.5 倍。这样算起来，能提供所需能量的汽油成本将变为 200 000 美元左右。因为低轨道航天飞机载荷为 24 000lb，所以从理论上讲，每磅运输成本将只有 8 美元，或相当于每人 3 万美元（因为航天飞机有 8 名乘员）。航天飞机使用的燃料当然不是汽油，但实际使用燃料的成本，也仅比汽油高十倍左右，或者说每次发射 200 万美元，这样算来，每位乘客的“船票”还可以 30 万美元搞定。不幸的是，现实远不是这样乐观和轻松。

### 6.3.3 星际旅行的当前成本

根据 NASA 网站提供的信息，航天飞机执行一次任务的成本，约为 4.5 亿美元[8]。也就是说，将一批载荷送入地球低空轨道的实际成本，约为燃料成本的 200 倍。折合每磅载荷 19 000 美元。我认为，成本如此之高，主要是因为航天飞机需要大量基础设施提供支持：人员、维修成本、燃料加工成本，等等。常见的一次性火箭，每次发射所需的资金规模也大致与此接近，虽然通常能便宜一点点。太空探索公司（SpaceX）开发的 Falcon-le 型火箭，据说单次发射所需成本最低，每磅载荷仅需 9000 美元[13]。但是，这种型号的火箭只能用来发射卫星，无法将人类送入低空轨道。如果我们用航天飞机来经营太空旅行项目，航天飞机仅能容纳 7 名乘员。也就是说，每人要收 6400 万美元才能回本。当然，航天飞机上的大部分空间都被实验设备占据。如果我们特别定制一艘“豪华游”专用航天飞机。也许能把乘员数量提高到 15 人（这是宽打宽算），这样一来，航天飞机的发射成本可以下降至每人 3000 万美元。

我们的估计有多贴近现实？2001 年以来，太空冒险公司共把 7 位超级富豪送上太空。他们被“联盟”号火箭送入轨道，每人在国际空间站停留数天。收费标准是每人 2000 万美元，如果想试试太空行走的话，另收费 1500 万美元。这与我们估

计的航天飞机升空成本接近。如果你细细阅读相关报道，就会理解为什么他们需要大量基础设施。所有打算遨游太空的游客，都必须在俄罗斯和美国境内一些造价昂贵的高科技基地受训长达数百小时。这些设施的人力成本也相当可观，因为每个进入同步轨道的人，都需要多达数十人的地面团队支持。2010年，太空冒险公司又在推销一种全新休闲游项目——绕月飞行，每位旅行者只需为此支付1亿美元。

这类假期还有另外一种潜在成本。自1986年以来，发生过两次航天飞机事故，并导致14名乘员死亡：第一次是“挑战者”号于1986年1月28日升空后不久爆炸；第二次是“哥伦比亚”号于2003年2月1日返回地球大气层后不久解体。也就是说，在此期间的135次飞行中，就发生了两起致命事故。大致相当于每60次航天飞行就有一次导致人员伤亡。已故诺贝尔物理学奖获得者理查德·费曼先生曾是航天飞机事故调查团队的一员，他严厉谴责NASA大大低估此类航行的危险程度。

> *要使一项技术获得成功，就必须把事实摆在首要位置，而不是更关心公众形象，因为自然不容愚弄*[83]。

对任何商业化运营的公共交通模式而言，如此高的死亡率都是不可接受的。人们乘坐飞机遭遇空难的比率，仅有千万分之一[30]。这个数字来自1989年公布的文件。不过近二十年来，并没有发生显著的变化。如果有，也只是在变得更安全。车祸方面，2009年的数据是每1亿km车程有一人丧生。如果我们假设“普通人”每年驾车行驶15 000mile，20年驾龄下来，死于车祸的几率是1/166[16]。也就是说，乘坐航天飞机一次的死亡几率，比驾车20年还要高2～3倍。如果死亡率长期保持这样的水平，就算很便宜，也没有人整天要去坐航天飞机。至于太空探索公司的行程是否同样危险，还需要更多的时间来判断。

要让太空旅行变成人们的日常活动，其价格还需要大幅下降，安全系数大大提升。不幸的是，这两个目标通常是互相冲突的，在其他条件不变的前提下，更高的安全性，通常意味着更高的成本。即便是一些简单的调整，比如因天气条件不利、燃油泄漏等问题推迟发射时间，都会带来动辄数十万美元的巨额损失[14]。

## 6.4 太空旅程的资金来源

对上文内容，我总结出以下几点：

- 让火箭进入低空轨道，有一笔最小能量成本是无论如何也不可能节省掉的，这就是让它达到轨道速度所需的动能；
- 你需要超过最低数量的能源，是因为你需要携带火箭消耗的燃料，至少是满足一部分路程。这方面的考虑，导致了火箭方程的诞生；
- 但是，送人类进入轨道的能量需求，跟发射总成本相比，只占很小一部分，这很可能是因为需要花费大量资金用于基础设施；
- 过去十年间，共有不到十个人自费进行了轨道飞行，每人的花费大概是2000万美元；
- 最后，对广泛开展任何商业项目而言，去往同步轨道的风险都未免过高。（最后这一条，是依据两次航天飞机爆炸事故而得出的结论。）

后面三点极为重要。我写这一章的时候，对航天的成本结构非常意外。我一直都还以为，让飞行器发射升空的燃料成本才是太空行程无法普及的原因，如果有足够便宜的能源，就可以变得普及起来。但现在一眼就能看出，我的猜想与现实完全不符。太空旅行的狂热拥趸们常说，官僚习气和政府机构极低的效率，导致了航天飞机升空成本居高不下，如果更加商业化的机构有机会参与进来，费用下降的幅度就将极为可观。这个说法很有趣，不过我倾向于不信。上文引用过的费曼那本书中，有发射航天飞机所需全部基础设施的完整列表。尤其值得注意的是，在其中一个部分，他阐述了计算机程序员为每次发射开发程序的过程。下面引用的这段文字，来自他为“挑战者”号事故调查撰写的附录部分：

> 软件采用自下而上的方式进行过彻底测试。首先，人们会逐行检查所有新增代码；然后会对所有程序片断和模块逐一检查。这样的过程逐级推进，直到所有的新变化都被整合入完整系统中，并确认无误。完成后的结果被认为是最新版本的最终程序。但此外还有另一个完全独立的检验团队，他们与软件开发组采用完全相反的流程，站在用户角度对产品进行另一套系统测试。新程序还会在模拟过程中受到检验，等等。任何在检验中发现的问题，就被看做严重失误，团队将对此追根溯源，并竭尽全力避免此后出现类似的问题[83]。

这当然是一个复杂耗时的工作：仅此一项，每次发射前，你都要花钱雇用大约二十名具备超强专业技能的专家，连续工作数月之久。而这只是航天飞机升空进入轨道前无数准备工作的其中一项而已。如果要让每一项准备工作都严谨到这种程度，基础设施项目的支出可能会比现在更高。

2006年，NASA开启了商业轨道运输服务计划，目的在于资助高科技公司，开发服务于国际空间站的“商业化人员和货物运输途径”。计划投入的资金规模为5亿美元，大致相当于航天飞机一次发射的支出水平。轨道科技公司和太空探索公司中标，获得了资金来开发货物运输设备。太空探索公司的“龙”飞船，也有潜力用于运送人员前往空间站[12]。美国航空航天局与太空探索公司签署了一项价值16亿美元的合同，委托该公司完成十二次发射，每次运送20 000kg物资，折合每千克6700美元。另外，由于“龙”飞船可以用来乘坐最多七名乘员，平摊到每名乘客的费用是1900万美元。不幸的是，这与丹尼斯·提图为他的拉风之旅支付的费用差不多。

根据上面提到的数据可以算出，目前为每次前往同步轨道的航天飞机花费的成本约为5亿美元。这么大量的资金，除了美国政府之外，实在是很难找到其他人愿意承担。让我们假设，有那么一家私人公司设法用1亿美元的预算开发出了可以重复使用的航天飞机（成本相当于政府支出的1/5）。再假设这种航天飞机的使用寿命是10年，每年能执行10次飞行任务，每次运送10名乘客，再假定每次发射的燃料成本是100万美元，基础设施支出与燃料相同（这是非常乐观的估计了，理由参看上文）。这样算来，航天飞机整个使用寿命的总成本是3亿美元。我用网上房贷计算器算了一下，如果项目运营商以5%的利率向银行申请全额贷款来做这个项目，10年后需要偿还的本息共计3.8亿元。因为航天飞机总共可以送1000名乘客上太空，所以每位乘客都必须支付38万美元，运营商才能回本。

我们上文所作的假设，的确也有可能过于悲观：最终也不可能降低的成本，其实只有燃料那一小部分。正如上文所说，每次发射的燃料成本，约为200万美元，或者说平均每人13万美元——如果我们能在“一日游专用”航天飞机里塞下15名乘客的话。如果我们能在此基础上让成本继续降低一个数量级，还将达到每人1.3万美元（要不想斤斤计较，就算整数，1万美元好了）。再假定基础设施成本控制在这笔钱十倍的水平上，那么太空假期的成本将为13万美元（每人次），至少可能到达他们的“轨道旅馆”。这依然超过了大多数人的承受能力，不过，就连不离开地球表面的高档环球游览项目，都有比这定价更高的。

可是，上面提到的“轨道旅馆”又是怎么回事？它真的可以建成吗？我们是否

真有可能在太空建造人工基地，容纳大批居民，或接待大批游客吗？

**注：**

A. 弗里曼·戴森曾在一篇非常有趣的论文中提到，如果设法得到方程，使飞船的发射初速与燃料载荷比相关，就能够得到优于火箭方程的解决方案。这通常只对燃料载荷比很高的情况有意义。我建议任何想要深入探讨这一话题的读者去读一下这篇文章[72]（详见该书第42页框中文字）。

# 第7章
# 太空殖民地

## 7.1 太空居民

20世纪30年代，科幻作家乔治·O.史密斯①曾创作一系列短篇小说，后来被结集成册出版，定名为《金星轨道站短篇全集》[222]。这些故事发生的地点，是位于金星轨道的一座巨大空间站。就是说，这座太空站围绕太阳运行，其轨道与金星重合，而位置领先金星60°角，不是环绕金星运行。这座空间站的用途，是充当无线信号中继站，帮助人类在地球、金星和火星之间传递信息。空间站上面有几百名工程师，以及若干辅助人员。故事主人翁名叫唐纳德·钱宁，他是空间站上的首席工程师，其使命是维持空间站运行，同时抵挡某些疯狂科学家、邪恶官僚和空间海盗的袭击。这是一系列纯粹的太空歌剧作品，故事非常好玩。而且，金星轨道站有着后世对于空间站设想的各种雏形。它有数量巨大的居民，有自己的生态系统，还有人工"重力"，通过空间站的自旋产生。而且位于金星与太阳之间的一个拉格朗日点上。

如今，就算我们真的去外星殖民，通信卫星也让我们无须为此维持有人值守的空间站。但是，对有人居住的大型空间站，目前仍在进行严肃的科学研究。其动机可以大致总结如下：

---

① 乔治·O.史密斯(George O. Smith,1911—1987)，美国科幻作家，20世纪40年代起活跃于美国科幻杂志，创作生涯持续至60年代。美国还有另一位科幻作家，名字是乔治·H.史密斯。

- 它们可以当成一个平台，来组织深空探索。空间发射探测器的成本，仅相当于地面发射成本的几分之一；
- 它们可以用于太阳能发电，再把电力送回地球；（空间电站不受大气和气候变化影响，可以全年 365×24 小时无间断运作。）
- 它们可以用于某些类型的工业生产，特定产业更适合在零重力环境下进行；
- 它们可以用于发展适合严格真空环境的产业；
- 它们可以帮助人类把极高污染的行业搬离地球，转入太空；
- 它们可以作为太空旅馆，用于发展太空旅游；
- 它们代表了人类迁离地球，进入太空的第一步。

正如前几章一样，我会本着钻牛角尖的态度考察这些理由能否成立。不过在此之前，我们需要先讲讲空间站背后的科学理论。

## 7.2 奥尼尔式殖民地

首先，我想描述一个新世界。在我看来，它的规模相对适中；它比我们前文提到的基地要更大，但还是比能够建成的最大规模小很多。“太空岛三号”利用材料的效率足够高，以至于到下个世纪初就能建成……依照当前已有的技术推算，“太空岛三号”的直径将有 4 英里，长度将有 20 英里，陆地总面积为 500 平方英里，能够容纳 700 万居民。

——杰拉德·K. 奥尼尔 《太空边境》

1977 年，普林斯顿大学的物理学家杰拉德·K. 奥尼尔提出，凭借当时的技术条件，就已经可以在太空建造永久性居住地，并使之拥有同地球表面生活的一切便利条件[189]。他提出了建设大型太空站，并在上面安置数千乃至数百万人的设想。这类太空站通常为椭球体或圆柱形，并沿主轴旋转，以便为里面居住的太空居民提供人工重力。

最早提出此类设想的并不是奥尼尔，他吸收了若干前人提出过的观点，包括康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基和 J. D. 伯纳尔，后两者都曾阐述过类似的设想。科幻小说家阿瑟·克拉克也把伯纳尔看作自己的理论先驱，他曾表示：伯纳尔的著作《世界、肉身与魔鬼》是他读过的最重要作品之一。但是，让这些观点广为人知

的，却是奥尼尔的专著。尤其是因为他的作品出版时间，是在人类成功登月之后不久。当时看来，人类探索更广阔宇宙空间的前景似乎已经近在咫尺。

在奥尼尔笔下，建造太空殖民地的动机非常高贵：读他的书，你能感觉到，这是一位富有自由主义精神，关心人类未来福祉的有志之士。在他设想中的未来，大部分人类都已经迁离地球，住进了太空殖民地。而重工业也被转移进太空，以免污染地球环境。人们在小行星带和月球开采资源以获取原料。他在为《当代物理学》杂志撰写的文章中预测，到 2008 年，将有 2000 万人生活在地球之外。到 2060 年，地外人类将超过地球人口[188]。他估计，能够容纳 10 000 名居民的空间站，造价约为 300 亿美元(大致相当于 2013 年的 1000 亿美元)。而此类空间站赚回投资的周期约为 20 年。他的著作促使 NASA 展开了几项极为详尽的太空移民科研项目，其中考虑了多种设计思路。第一项是给人印象深刻的《太空城市设计研究》，这是一份长达 185 页的研究报告，覆盖了多种多样的主题，包括发射系统、辐射防护，以及如何避免纯人工生活环境下可能产生的心理焦虑等课题[10]。这份报告的全文以及很多其他相关材料，都可以在网络上找到。文档最晚更新时间是 1992 年，杰拉德・K. 奥尼尔逝世的那一年。

## 7.3 重力问题

一个非常重要的发现是：从房顶跌落的人，不会感觉到自身的重量。

——阿尔伯特・爱因斯坦

无论是在科幻小说还是现实世界，太空站都有一个突出的特色：那里要么“没有”重力，要么就是通过自转产生一种模拟重力的效果。《星际迷航》系列还提供了第三种选择：其中的人们“制造”出了人工重力，但目前地球人普遍认为这是不可能的。

第一种情形，也是现在的国际空间站实际出现的效果，就是其中的人们飘来飘去，貌似不受重力影响。但是他们为什么会这样，却不像表面看起来那么简单。只要计算一下国际空间站上的重力就会知道。对一个球形星球而言，任何与地心距离为 $r$ 的点，重力加速度都可以按照下列公式计算得出：

$$g=\frac{GM}{r^2} \tag{7.1}$$

国际空间站的轨道距离地面大约 400km($4\times10^5$m)。所以,它离地心的距离就是地球半径(6400km)加上轨道高度(400km),总值为 6800km,也就是 $6.8\times10^6$m。物体的重量,就等于其质量乘以所在地的加速度($W=mg$)。因为越是远离地心,重力加速度越小,所以,我们假设物体的重量也会随之减小。所以就会有人认为,国际空间站里的人们处于“失重”状态:他们一定是距离地心足够远,以至于重量下降到了接近于零。这种理解是错误的,以体重 80kg 的成人为例,在地面上,重力加速度值为 $9.8\mathrm{m/s^2}$,所以,他的重量就是 $80\times9.8\mathrm{m/s^2}=784\mathrm{N}$($1\mathrm{N}=1\mathrm{kg\cdot m/s^2}$)。如果我们根据上文得出的公式,计算国际空间站上的重力加速度,结果是 $8.7\mathrm{m/s^2}$,意思是 80kg 的成人,在空间站上的重量为 $W'=8.7\mathrm{m/s^2}\times80\mathrm{kg}=694\mathrm{N}$。或者说相当于地面重量的 88%。日常语言中的“零重力”或“微重力”等字汇,用来描述国际空间站时,实际上只是大众的曲解。真正的现实情况是:国际空间站上的人们,长期处于自由落体状态。

自由落体是个重要的概念,我们在这里需要讨论两点:

- 下坠过程中的人不会感觉到自身的重量。
- 为什么有些下落中的物体可以永不坠地?

## 7.3.1　为什么下坠中的人感觉不到自身重量

> *……做过这一实验的人向您保证:从 200 意尺[①]的高度同时抛下的球,无论其质量是 100 磅,200 磅,还是更多,它落到地面的速度,都不会比仅有它一半质量的球更快一星半点……*
>
> *——伽利莱·伽利略　《两种体系的对话》*

上面引用的文字记载了伽利略的一项重大发现,后来奠定了现代力学的基础:重力影响下的物体,其加速度与其质量无关。如果我们手持两颗质量不同的铁球,从高塔上同时放手,它们几乎将在同一个瞬间落地,尽管其质量可能存在巨大差别(此处忽略了空气阻力可能造成的任何影响)。

下面我们来考虑一道思考题:在很多游乐园,都有一种“速降塔”游戏。这东西把人带到特别高的地方,然后向地面速降,直到非常接近地面时才停下。假设

① 古意大利的长度单位,1 意尺约为 66cm 或 68cm。

你去玩这个项目的时候，自己口袋里装了一个苹果。等你升到高空，就把苹果取出来，等速降开始时，放手松开苹果。

被放开的苹果当然会向着地面跌落。但与此同时，你也在以同样的加速度下坠。在你看来，苹果就像是悬停在空中。如果你把苹果推开，它就会远离你，运行的轨迹看上去是直线。这只是从你的视角来看，对旁边的观察者而言，苹果的运行轨迹将是抛物线。你感觉不到自身承受的重力，是因为你周围的一切都在以同样的加速度向下坠落。我们日常生活中感受到的“重力”，其实并不是真正的重力。我们站立时感受到的重力，其实是地面将人体向上顶起，让我们不至于掉落地底的力。正如从房顶跌落的人感受不到自己的重量一样，太空站中因重力作用而不断下落的宇航员，也不会感受到自身的重量。

### 7.3.2 为什么有些下落中的物体可以永不坠地

假设我们拿到一颗铁球，从高塔上丢落，在其下落过程中测量其下坠距离。我们将发现，在时间为 $t$ 时，其下坠距离 $y$ 可以用下列公式计算得出：

$$y=\frac{1}{2}gt^2 \tag{7.2}$$

其中 $g=9.8\text{m/s}^2$，是地球表面附近的重力加速度数值。1s 时间内铁球坠落的距离是 $y=1/2\times 9.8\text{m/s}^2\times(1\text{s})^2=4.9\text{m}$。然后，我们试着将球沿着平行于地面方向抛出，也就是说，让球的飞行路线与地球表面平行。令人吃惊的是，只要保持了水平方向，那么无论我们扔得多快，球落回地面的时间始终不变。这是因为，在水平于地面的方向上用力，不会让球远离或靠近地面。球所承受的唯一引力指向地心。很多人都有一种直觉，认为水平方向上的运动速度越快，在给定时间内下坠的距离就越短。像《宾尼兔》动画片中的大坏狼威利跑过头，悬停在悬崖上空时一样。不过正如很多卡通片中的物理学异象一样，这一点也与现实不符。

如果地球像短距离内的视觉印象一样，表面是平整的，那么水平抛出的铁球迟早会掉落地面。但是由于地球表面是球面，铁球飞出的途中，下方的地面也在一点点下沉。如果你能在水平方向飞行足够远的距离，结果就会远离地面。在铁球需要沿水平方向飞多远，才能使它距离地面 4.9m 呢？我们需要借助一点几何学知识来解出想要的结果。设 $x$ 是水平方向的运动距离，$y$ 是距离地面的高度，而

$R$ 是地球的半径(6400km,或 $6.4\times10^6$m),根据毕达哥拉斯定理:

$$x^2+R^2=(R+y)^2=R^2+2Ry+y^2 \tag{7.3}$$

消掉等式两边都有的 $R^2$,得到

$$x^2=2Ry+y^2\approx 2Ry \tag{7.4}$$

此处利用了 $y$ 远小于 $R$ 的事实。由此可解出:

$$x=\sqrt{2Ry}=\sqrt{2\times4.9\text{m}\times6.4\times10^6\text{m}}=7920\text{m} \tag{7.5}$$

所以,如果铁球在1s内沿水平飞行7920m,其下坠的距离就将与地面“下弯”的距离相等。换个说法就是:任何以7920m/s水平运行的物体,都可以永远不落在地面上。因为它每秒钟下坠的距离,总是与地面下弯的距离相等。这件物体的轨迹将成为圆形,其半径与地球半径大致相等。

请注意,这个结论得出的信息,恰恰就是方程(6.3)说明的内容。事实上,后来的解释提供的信息更少,因为我们把重力值限定为特定数值。不过,只要稍加修改,上文中的推演就可以适用于离开星球任意距离的卫星所需的环形运动速度。

## 7.4 太空站中的人工“重力”

有位驾驶航天飞机的宇航员曾经告诉我,最早进入太空的那几天,感觉就像坐上过山车,永远不停地向下坠落。他把这种感觉称作“内脏惯性反应”,意指由于重力的缺失,脏器轻微移位的状况。这是失重状态容易造成的问题之一。长期在失重状态下生活的宇航员会面临一些健康方面的问题,因为人类的身体是在重力较大的环境下进化而成的。

在一些较老的科幻作品,比如罗伯特·海因莱因的《严厉的月亮》中,会看到类似于这样的说法:低重力或完全失重环境下,人类的寿命会延长,因为心脏无须像原来一样费力,就能把血液送达全身[119]。现在看来,这类说法应该是有问题的。长期处于失重状态的人类容易出现厌食、身体被拉长数英寸、免疫系统缺陷、骨骼和肌肉变形、肥胖程度上升等一系列问题。短期内,这些问题都不算严重。但我们目前还不知道,长年生活在失重环境下会造成怎样的后果。如果我们能给太空站的居民提供某种人工重力,肯定是更好一些。

最简单的办法,就是让太空站自旋。电视剧《巴比伦五号》,就把故事背景设

定为一座旋转着的太空船上。这条飞船是圆柱形，长 5mile。它沿着长轴旋转，以便让乘员有类似于重力的感觉，就像很多其他科幻小说一样。类似作品还有我们已经提到过的《金星轨道站短篇全集》，罗伯特·海因莱因的少儿科幻作品《太空军官候补生》，等等。假设太空站就是一个长长的空心圆柱体，围绕其长轴旋转。如果圆柱的半径为 $R$，旋转速度为 $v$，那么在外缘绕着中轴旋转的物体加速度为：

$$a=\frac{v^2}{R} \tag{7.6}$$

这里的加速度是向心的，也就是说，指向圆柱的中心方向。对一个体重为 $M$ 的人来讲，向心力大小为 $Mv^2/R$，并由他脚下的太空站外壳向他的脚底施加。

这一状态的另一视角，是从太空站内部人的眼光来看，他被困在旋转的太空站里面。在他看来，是有一股力量把他“按”在飞船外沿：这股力量像是从太空站中央向周围发出的，其大小是

$$g_{\rm eff}=\frac{v^2}{R}$$

他会把这力量当作(想象出的)离心力，这力量使人被压在飞行器外壳上。所以，如果太空站旋转的速度足够快，乘客就可能会感觉到自身的正常重量。如果太空站直径为 1km，我们需要的旋转速度为

$$v=\sqrt{gR}=\sqrt{9.8\,\text{m/s}^2\times 1000\,\text{m}}=99\,\text{m/s} \tag{7.7}$$

达到此速度，就能在太空站模拟出跟地球相等的重力效果。用这里的结果代入计算，得知太空站旋转一周的时间刚好是一分钟多一点。但是这种人工模拟重力环境，与地球上的情况有着巨大的差别。

## 绳端甩脱

太空站自旋，会产生一些有趣的结果，有的并不是地球表面的人们平常就能看到的。旋转导致了两种“类力效果”：除了向外壳施加的离心力之外，还有一种“科氏力”，作用于运动中的物体。科氏力在地球表面同样存在，不过要比重力小很多，因而很少被察觉。它主要影响规模较大的动态系统，比如飓风。科氏力使北半球的飓风向一个方向旋转，而南半球的飓风则向着另外一个方向旋转。^ 不过到了太空站上，科氏力的影响将更为明显，因为太空站的范围较小，而每旋转一周所需的时间也更短。

想象你自己站在太空站内部，手握一个苹果，并放手使其跌落。从(随着太空站一起旋转的)你的角度看，苹果因为受到离心力的作用，落在了紧临你双脚的“地面”上。但是，对身处太空站以外的旁观者来看，情况就大为不同了。我们假设有这么两个人，分别叫做苏姗和麦克。这两个名字来自20世纪90年代的电视系列片《巴比伦五号》，片名意指一座同名的奥尼尔式殖民地。麦克·加里波第是太空站安全部队的首领，而苏姗·伊万诺娃是他的副手。直到现在，这部作品依然是少数把空间科学细节做好了的连续剧之一，仅有的问题是让宇宙空间有了声音。现在我们假设苏姗穿上了宇航服，飘浮在空间站外面向里面看。麦克在空间站以内，手握一个苹果，准备让它“落下”。麦克眼中看到的苹果运行方式，会跟苏姗看到的情形大不相同。这是因为，在空间站足够大的情况下，麦克不会意识到它的转动。

麦克和苹果一起，都在随着太空站中的其他物品一起旋转。不过，当麦克放开苹果时，苹果却不再旋转，而是沿着圆面切线的方向作直线运动。它保持了被放开之前那个瞬间的速度。这点是理解两人不同视角的关键：由于它和其他物体都在随着太空站一起旋转，所以在他看来，苹果也在移动中。当麦克放开苹果时，牛顿第一运动定律开始发挥作用，苹果作直线运动。它掉落的位置，就在麦克①的脚随其他物品一起转动到的位置附近。在苏姗看来，苹果是匀速直线运动的；对身处太空站内部的麦克来看，苹果像是从自己手中跌落，并逐渐加速到达太空站外壁。加速印象形成的原因，是他本人没有保持直线运动状态。但是，由于跌落之前的苹果在麦克手中，距离太空站中心的距离要比他的脚更近。没有被放开之前，苹果沿着较小的圆圈围绕飞船中心转动，但每转一圈需要的时间，跟麦克的脚完全相同。因为苹果在同样的时间移动了较短的距离，所以它的速度比麦克的脚略慢。如果苹果从2m的高度掉落，那么其运动速度，就要比麦克的脚更慢0.2%。也就是说，苹果不会正巧落在麦克双脚所在的位置，而是略微偏向空间站旋转的反方向一点点。

这就是科氏力带来的一种影响。(我要特别提醒读者，我们在此处讨论的，只是科氏力的一个方面。想找到相关的详细论述，可以参考任何一本高级力学课本，例如赫伯特·古德斯坦因的《经典力学》[99]177~183)。如果太空站沿顺时针方向旋转，那么在麦克看来，就像是有某种力量在苹果下落过程中把它向着逆时针方

---

① 此处原文用错了人名。

向推。除了在太空站内部快速移动，以及在中心附近被向上抛起的物体之外，其他物体的运行线路，都会显得特别诡异。如果你在空间站内投球，它飞行的线路会显得鬼使神差。但这只是假象！球一旦脱手，就不再受力。从太空站以外的旁观者角度看，它是沿直线飞行的。太空站里的人感觉球的运行线路诡异，是因为他们自己在旋转。也就是说，虽然旋转中的太空站里面有很多物体都貌似受到重力影响，但旋转出来的模拟重力，还是跟真正的重力场大不一样。

由于地球的自转，火箭就会受到科氏力的影响。由于地球的外形和实际存在的重力影响，科氏力的数学描述可谓非常复杂。而旋转中的太空站，可就简单得多了。由于其中的几何形状非常简单，球的受力情况也就很容易分析。但是，站在太空站内部分析其运行线路，却会得出非常不直观的结果。

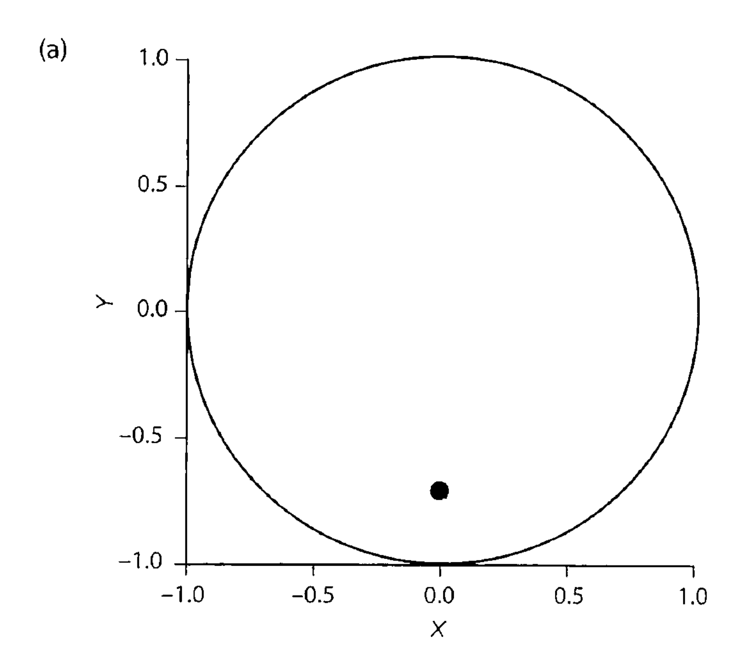
当巴比伦五号花园里的迈克·加里波第丢出一个棒球时，他貌似看见了两种力的作用效果：一种是与重力效果类似的离心力，促使球向太空站外墙跌落；另一种是科氏力，它的效果不会显现在真正的重力系统中。如果太空站的尺寸不够大，我们可以断定科氏力一定会显现。科氏力的大小与物体的飞行速度成正比，方向与其运动方向垂直。但是，在写到旋转中的太空站时，多数科幻作家都会无视科氏力的影响；他们似乎假定：在航天器足够大的情况下，科氏力的影响将可以忽略不计[189]122~124。此外，即便在提到了科氏力的科幻小说和科学展望文章中，也完全局限在平行于飞船长轴运动的物体方面。比如，有些作品中提到，沿着奥尼尔式殖民地长轴方向被掷出的物体，运行中会显得向逆时针方向偏离。如果你沿着垂直于飞船长轴的方向投掷物体，通常的观点认为，你可以忽略科氏力的影响。事实完全不是这样，对直径小于 1km 的太空站而言，科氏力的影响非常明显而且诡异。让我们来看看，当一个旋转中的系统中有人打算开始扔球时，会发生什么事。

假设飞行器是简单的圆柱体，圆面半径为 $R$，圆柱长度为 $L$，飞船围绕主轴旋转的角速度是 $\Omega$，我们建立一个三轴$(x,y,z)$坐标系，其中 $z$ 轴指向圆柱的中轴方向。由于 $x$ 和 $y$ 都只是以飞船为基准的坐标，因而无法构成静止的参考系统。我们因此再设定一个假设为静止的参考系。在时间 $t=0$ 时，这个坐标系的两轴 $X$ 和 $Y$ 与 $x$ 和 $y$ 的位置重合。在任何时间点，两个坐标系之间的换算关系为

$$x=X(\cos(\Omega t))+Y(\sin(\Omega t)) \tag{7.8}$$

$$y=Y(\cos(\Omega t))-X(\sin(\Omega t)) \tag{7.9}$$

那么，假设迈克站所在位置坐标为 $x=0, y=-y_0$（如图 7.1(a)中黑点所示位置）。这时他掷出一个球，球在 $xy$ 坐标系中的速度为$(v_x, v_y)$，那么，球的飞行线路将会怎样呢？



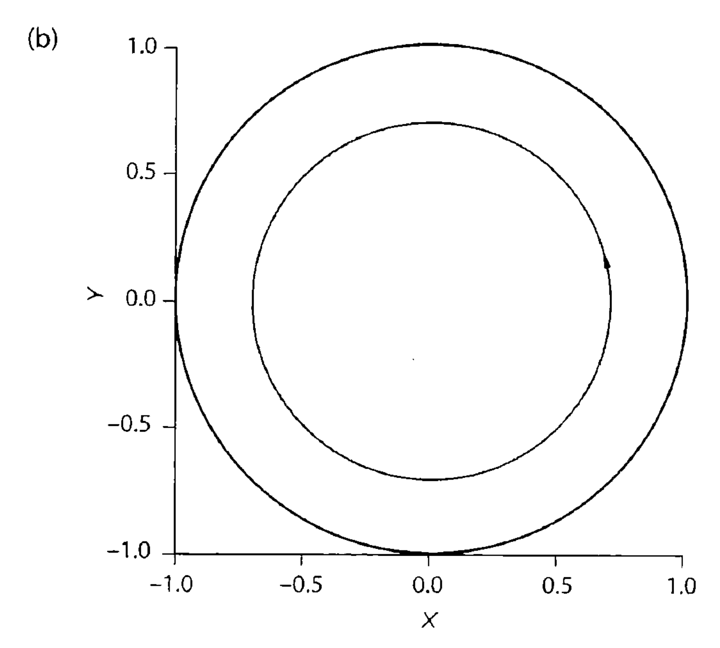




图 7.1　“环形轨道”抛球时的运动线路

对飘浮在静止坐标系 $XY$ 中的苏姗而言，球的线路非常简明：它沿直线飞行，速度为$(v_x - \Omega y_0, v_y)$。因为一旦它离开了迈克的手，就不再受到任何外力的作用。（像世界各地所有值得尊敬的物理学家一样，我们也选择了无视空气阻

力）。在苏姗看来，直线运动的球在时间 $t$ 的位置为

$$X(t) = (v_x - \Omega y_0)t \tag{7.10}$$

$$Y(t) = -y_0 + v_0 t \tag{7.11}$$

可是在迈克看来，事情就没有那么简单了。

我们来分析一下其中几种情况：

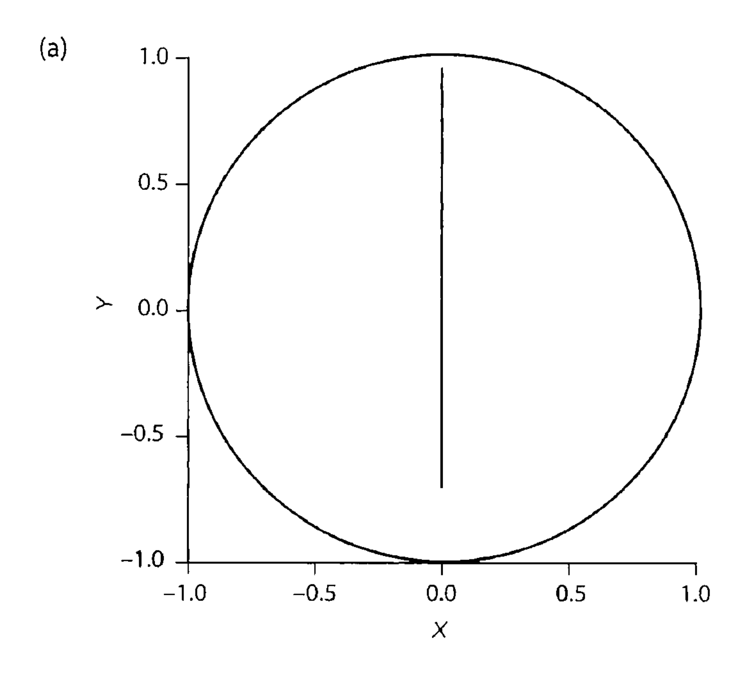
(1)“环形轨道”：$v_x = \Omega y_0, v_y = 0$。迈克用跟他的旋转速度完全一样的速度，逆时针方向丢球。此时在苏姗看来，那颗球停止了移动，因为在静止参考系中，它的速度是零，如图 7.1(a)所示。但是迈克却在静止的球下方旋转，在他看来，球是在绕着太空站中轴旋转如图 7.1(b)所示。图 7.1 画出了这个球在两个不同坐标系中的运动轨迹。箭头表示在非静止参考系中球被掷出的方向。

对一个掷出的球来讲，这样的运行轨迹并无不妥。可以参考的范例包括“巴比伦五号”，以及《2001：太空漫游》中的“发现号”。发现号旋转部分的直径是 11m[58]。如果“发现号”要借助旋转模拟 1$g$ 的重力加速度，船身旋转的速度将是 7m/s 左右。在《巴比伦五号》中的《夜暮降临》一集中，苏姗·伊万诺娃曾说，飞船的花园部分以 60mile/h 的速度旋转(相当于 28m/s)。考虑到飞船直径为 0.8km，花园的人工重力为 1/3$g$，那么这个转速数字大致是严谨的。甚至在奥尼尔提出的“1 号空间岛”方案中，飞行器外壁的转速也仅有 45m/s 左右。与美国棒球大联盟投手掷出的球速相当[189]。

(2)“肩上投球”路线：$v_x = \Omega y_0, v_y = v_x$。以斜向上 45°角沿逆时针方向丢球，会导致球在空中折返回来，越过投掷者头顶落在他身后，如图 7.2(b)所示。在静止参考系中，球沿着 $y$ 轴方向直飞，直到它的轨迹与船体外壳相交，如图 7.2(a)所示。因为 $v_y$ 数值相对较大，球来不及环绕一周就会与外壳相撞。

(3)“身后折返”路线：$v_x = \Omega y_0, v_y = 2\Omega y_0/\pi$。路线得名的原因，是球要从投掷者身后飞回，打在他后脑勺上。在这种情形下，$y$ 的数值足够小，以至于球在撞到船体外壳之前，可以环绕一周飞回，如图 7.3(b)所示。可以想象，在“巴比伦五号”太空站，高尔夫球是一项非常危险的运动。

(4)“空中涂鸦”路线：$v_x = \Omega y_0, v_y = 0.8\Omega y_0$。$y$ 方向的速度越小，球在撞击飞行器外壁之前能够飞过的圈数也就越多。这个路线相当复杂，尽管开始阶段与环形线路有相似之处。与仅受重力影响下的两物体环绕运动不同，图 7.4(b)中的轨迹很不稳定，初速度略有不同，就会造成最终线路的巨变。



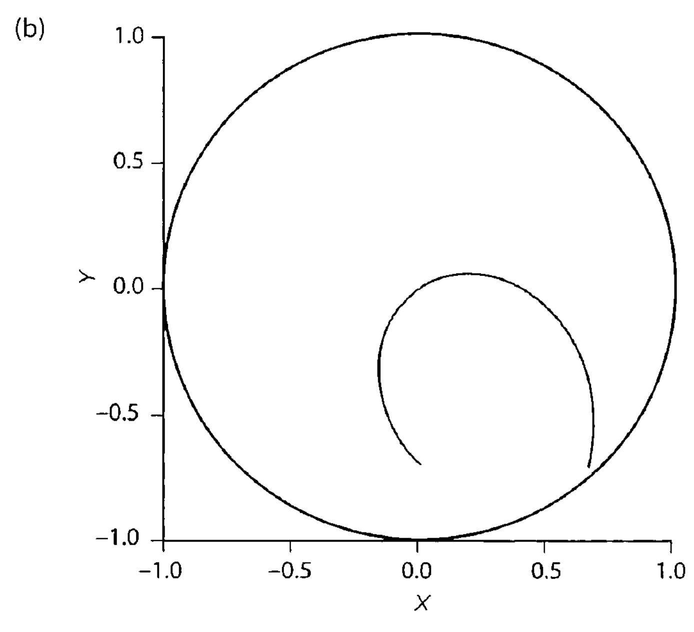
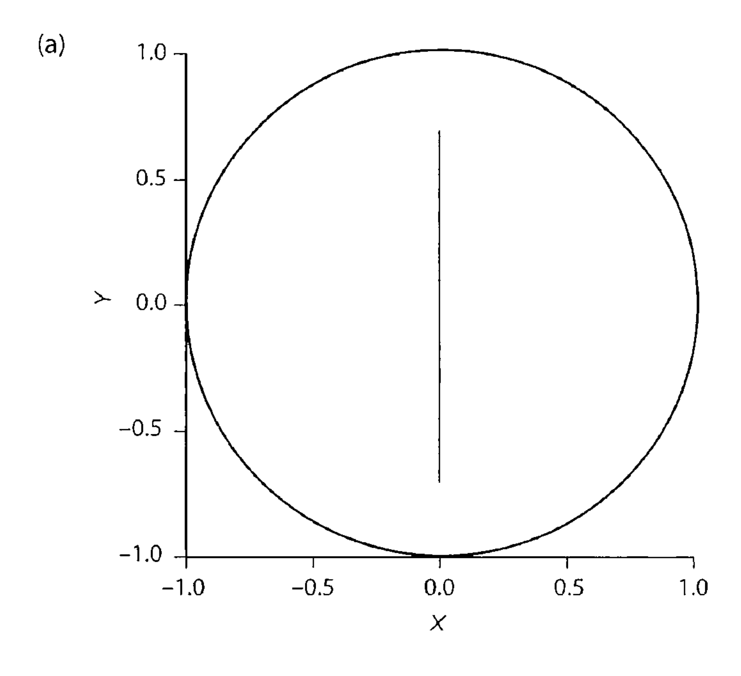




图 7.2 “肩上投球”路线

小型自旋宇宙飞船上的力学法则看起来是如此不合常规，简直给人一种看卡通片的感觉。在小说《天空的孤儿》中，罗伯特·海因莱因写到一艘能够自给自足的飞船，在群星之间遨游。天长日久，其中的人们已经忘记了外界宇宙的存



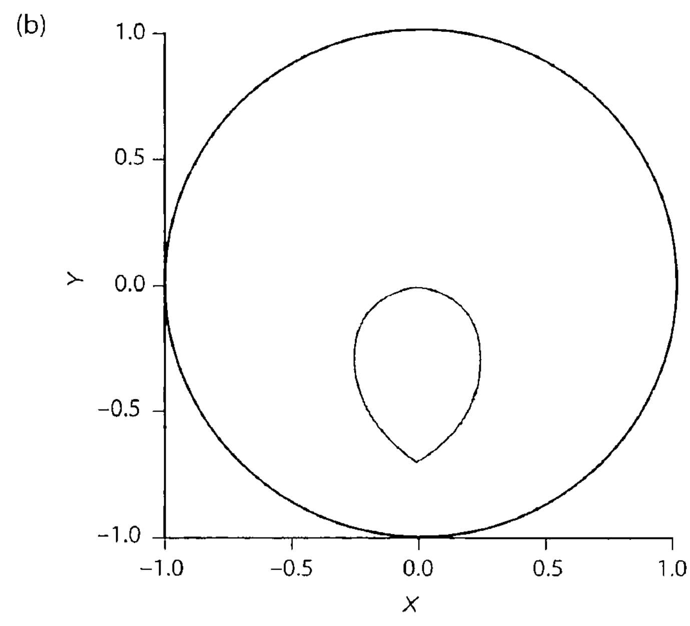
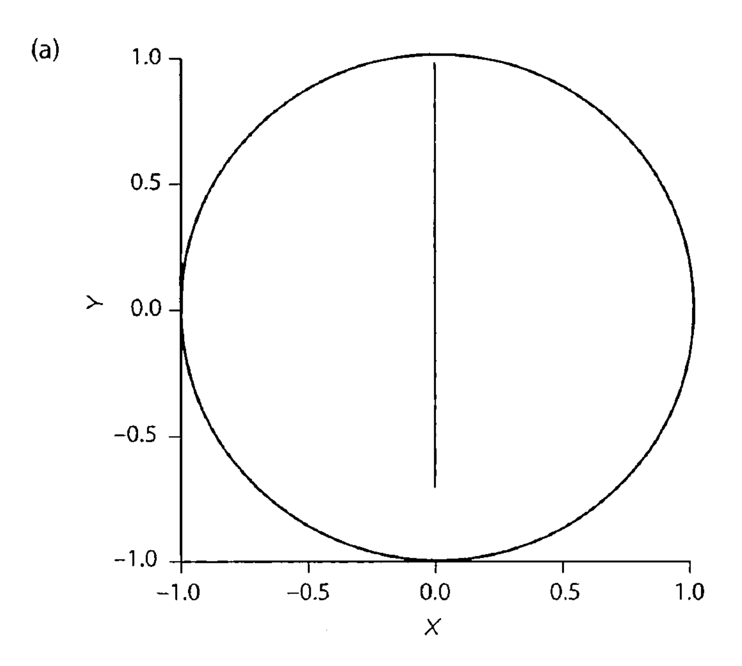




图 7.3 “身后折返”路线

在[117]。这不禁让我遐想联翩，不知那个世界里的伽利略或者牛顿，会总结出怎样的定律来描述他们世界的现实。



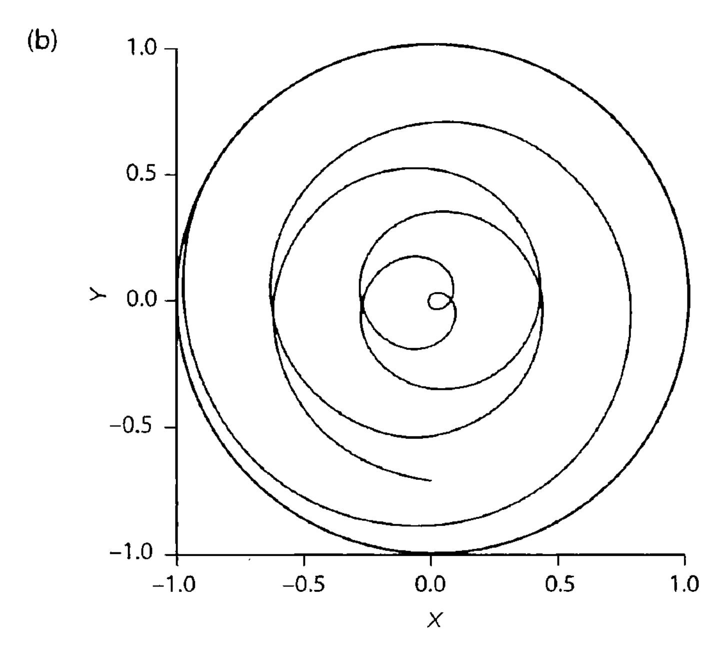




图 7.4 “空中涂鸦”路线

## 7.5 拉格朗日点

在前面的章节中，我们谈到过低轨道和地球同步轨道卫星。这两个轨道都是科幻小说中太空站常常会选择的地点。但还有另外一种选址方案，跟前两种一样普遍：这就是地-月系统中的 $L_4$ 和 $L_5$ 拉格朗日点。

迄今为止我们谈到的卫星轨道，都只考虑到两个物体之间的引力：在这些轨道中，唯一需要考虑的重要因素就是地球对卫星的引力。拉格朗日点的概念，则牵扯到更为复杂的三体问题，或者说互相独立的三个天体之间的引力问题。虽然借助电子计算机的力量，三体问题也是可解的，但却不像两体系统那样，能够得出周期性轨道。

上述结论最大的例外情形，就是拉格朗日点，最早由物理学家约瑟夫·路易斯·拉格朗日发现。在三体系统中，如果假定其中一个的质量远小于另外两个，也就是考虑较大天体的轨道时，可以忽略第三天体的影响，只考虑两者的质量和运动轨迹，那么三体系统就是有解的。图 7.5 标示出了地-月系统中的 5 个拉格朗日点。

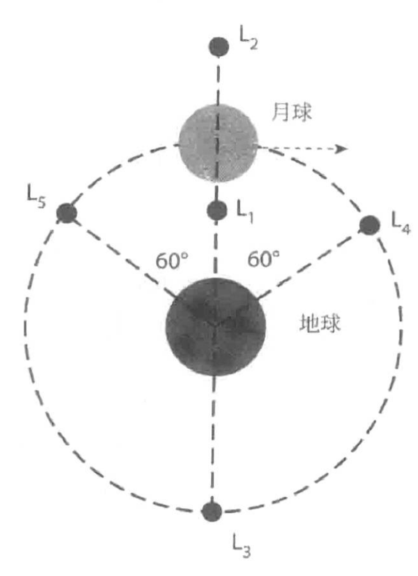



图 7.5 地-月系统中的拉格朗日点

从 $L_1$ 到 $L_3$ 的 3 个拉格朗日点，很容易得到解释，考虑此处的受力平衡就可以了。来自地球的引力，与月球引力和围绕地球(更确切地讲，是地-月系统质量中心)旋转产生的离心力互相抵消。但是这些地点却并不稳定，时间一长，此处的物体就容易越飘越远。它们还是有利用价值的，因为飘走的时间大大超过任何太空项目的周期。例如，计划中的詹姆斯·韦伯太空望远镜(哈勃太空望远镜的后继者)就打算放置在 $L_2$ 点。对 $L_1$ 点的位置，我们可以通过平衡太空站受到的地球和月球引力计算得到：

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{Gm}{(R-r)^2} \tag{7.12}$$

在这一等式中：

- $r$ 是地心到空间站的距离；
- $R$ 是地心到月球中心的距离；
- $M$ 是地球的质量（$=5.97\times10^{24}$ kg）；
- $m$ 是月球的质量（$=7.35\times10^{22}$ kg）；
- $G$ 是通用引力常量（$=6.67\times10^{-11}$ N·m²/kg²）。

将上述方程变形，可得出：

$$\frac{r}{R-r}=\sqrt{\frac{M}{m}}$$

由于地球的质量远高于月球质量。$L_1$ 点到月球的距离，会比它到地球的距离近得多。根据我的计算，应该在地球-月球直线距离约十分之九的位置。但这还不是全部，我们还需要考虑空间站围绕地球旋转而产生的离心力。这力量像是在把空间站推得更加远离地心。（这里的离心力，与我们用来模拟重力效果的力量是一回事。）由于它会抵消掉一部分地球引力（仅限于此特定场合），这样就会让拉格朗日点向地球方向移动约5%，这至少是我的计算结果。离心力对于 $L_1$ 位置的影响还不算太大，但在确定 $L_2$ 位置时，就成了必须考虑的重要因素了。$L_2$ 的位置在月球轨道之外，所以在计算地球和月球引力的时候，都需要考虑离心力影响。$L_3$ 的位置，隔着地球与月球相对，这时同样需要考虑离心力对引力计算的影响。有些科幻小说中谈到“反地球”的概念，其中假定另外一个与地球同样的星球，隔着太阳与我们相望，这个“反地球”的位置，就是太阳-地球系统中的 $L_3$ 拉格朗日点。我们无法看到那颗星球，因为太阳总是会挡住视线。我猜想，这里很适合当作《超人》漫画中比扎罗星人所在的位置，但却没有看到过这样的说法。

$L_4$ 和 $L_5$ 两个点位于月球环绕地球的轨道上，分别在月球前方和后方60°角位置。它们距离月球和地球的距离相等。奥尼尔曾提出，这里是建造太空殖民地的理想地点[189]。处于这个位置的物体会继续保持运动轨道的原因，并非一目了然。大致上，它所受到的地球和月球引力形成的合力，正好指向地-月系统的质量中心。如果在此位置的太空站，围绕地-月系统质量中心运行的速度与月球相等，就将可以一直停留在轨道上[232]。

$L_4$ 和 $L_5$ 两个点高度稳定，在这个位置的太空站即便被推离轨道，也会围绕拉格朗日点的中心旋转而不会持续偏离，$L_1$ 到 $L_3$ 这几个位置就没有这样的优点[232]。不过，$L_4$ 和 $L_5$ 距离地球和月球的距离都比较远，要把卫星送入轨道的能

量成本也相对较高。为什么还要选择它们呢？

奥尼尔最初的论文显示，他之所以选择这两个点，是因为他的计划非常富有野心。请注意我们前文提到过的一个细节：他认为到21世纪中期，地球以外居住的人类数量，就将超过地球人口。所以说，他需要足够的空间大兴土木，兴建极其庞大的设施。他甚至设想在遥远的将来把这些设施连接起来，组成一个类似于戴森球的极庞大结构，以便让后世更为先进的文明，攫取太阳放射出的全部能量[188]。奥尼尔还曾提出，兴建如此庞大的设施，应该需要开采月球上的矿产资源。从一定程度上讲，选择这两个拉格朗日点也是一种折中，是环绕地球和环绕月球修建殖民地的中间方案。他明智地指出，由于月球的逃逸速度只是地球逃逸速度的1/3，从月球出发运送物资去拉格朗日点的能量成本，将大大低于从地球出发的方案。不过，这就要求人类有能力开采月球矿产。当时的人们以为，在阿波罗登月计划之后，这样的时代很快就会到来。可实际上，这件事到现在也还是没能实现(也不清楚以后有没有实现的可能)。

## 7.6 地外生态和能源问题

现在我们已经给太空殖民地提供了重力，并确定了它在宇宙中的位置，上面的居民还需要些什么呢？当然应该有食物、空气和0～30℃之间的环境温度，这些都是人类生存的基本需求。但是，我们却不能用从前满足宇航员的方式来达成目标。因为我们要建造的是太空殖民地，它应该是一个自给自足的系统，能够长期支持人类在上面生活，而不是仅仅几天，至多一星期的短期旅行。这就意味着，太空站需要某种生态系统：上面生活的人们需要自己种植粮食作物，并回收废品，以便能够尽可能脱离来自地球的支持。要不然，在经济意义上，这样的太空站就无法维持，因为向太空运送物资的成本过于高昂。建造这样一个自给自足的人工系统绝非易事。尤其是当人们考虑到“地球号”宇宙飞船的大小以及错综复杂的生态依存关系之后。

### 7.6.1 食物

一名体重80kg的成年男子，每天大约需要2000kcal热量的食物。体重70kg的成年女性需要约1800kcal(作为衡量食物能量价值的单位千卡，数量等于

4200J)。如果不考虑其他营养需求,有几种方案可以用来单纯提供热量:肉类是能量价值最高的食物,卡路里含量约为 3000kcal/kg,而水果和蔬菜的热量值较低(约为 600kcal/kg)。不过,从生产过程需要消耗的能量角度考虑,肉类的生产成本却是非常之高,因为用于生产肉类的牲畜,本身还需要消耗其他形式的食物(通常是谷类作物)。跟人类直接食用谷物相比,喂养牲畜然后食用肉类,要多消耗十倍的能量。太空站能够用来种植粮食作物的空间,可能是全世界最昂贵的不动产。因而我高度怀疑,其中应该只能有极小的比例被用来喂养牛、猪或鸡。假设太空站所有的居民都是素食主义者,那么他们每人每天大约需要食用 3kg 的谷物和蔬菜。对一个容纳 10 000 名居民的空间站来讲,就是每天需要 30 000kg 食物。每年的食物需要量约为 $10^7$kg。

到这个节点上,科幻作家们纷纷开始采取彼此大相径庭的处理方式。太空站是否会采取传统的农业种植方式,也就是开辟广袤的土质种植区域,并提供光照呢?还是会采取水栽法?植物要不要人工施肥?如果要人工施肥,肥料又该如何生产?值得一提的是,使用哈勃-博世方法人工生产氨水的能量代价巨大,而现代农业又高度依赖这一过程,它甚至消耗了全球 1%~2%的能源[106]。海因莱因的小说《太空农夫》探讨了这方面的问题。故事背景设定为木卫三①上的一座殖民地,而不是空间站。书中详述了太空农业的各种生态需要。书中的农业生产用非常低技术的方式进行:人们用从地球运来的细菌和有机物,增加木卫三表层土壤的肥力,做法近乎刀耕火种[111]。考虑到书中展现的其他高技术细节,海因莱因的农业设定有点令人难以理解。书中的人类可以自由转化物质与反物质,因而已经得到了取之不尽的能源。

理清这些复杂难解之处的一种方式,就是考虑种植和食用食物过程中的能量转化,本质上,我们只是在将一种能量形式转化为另一种。未来的科幻作者,当然还是需要搞清楚很多细节。不过我们还是迅速假定一些前提,看看能得到怎样的结果。

- 首先,我们假定太空站围绕地球或者月球旋转,或者位于地-月系统的一个拉格朗日点上。这可能是科幻小说中最常见的标准设定了。不过我们还要再作一点简化,假定太空站得到的太阳光照,与地球表面完全相同。
- 其次,我们假定自己有一座巨大的空间站需要养活,而且它在很大程度上自给自足。是否完全自给自足,我们暂且不论,反正它所需要的全部食物,都假定为自己设法在原地生产。此外,我们还将假定空间站上有 10 000 名

① 这颗卫星英文名字的音译为“盖尼米得”。

居民，这个数字还是跟“巴比伦五号”剧集的设定一样。

- 第三，我们假定种植庄稼所需的能量都来自太阳。当然，这个也不是必然的。不过地球农业就依赖太阳，同样的设定易于理解，而且免费。我们无须假定阳光必须直接照射农作物，我们可以利用太阳能发电，再用电力发光照射水培箱。地球大气层以上的太阳光照常数是 $1360\text{W/m}^2$，意思是说太空站正对太阳时，每平方米光照区域获得的能量是每秒钟 1360J。
- 最后，人们假设每人每天的热量消耗是 2500kcal。这是个能量消耗速度，换算成公制单位，相当于每个人的耗能功率 120W，跟一个亮点儿的灯泡差不多。总功耗也就是每人 120W 乘以 $10^4$ 人，等于每天需要用食物的方式提供 $1.2\times10^6\text{W}$ 的能量。

在上述至少两个环节中，会存在效率低下的情况：

- 仅有一部分太阳光能转化为存储于植物体中的能量。
- 植物仅有一部分可能食用。

非常粗略地讲，植物通过光合作用将太阳光转化为生物能的效率约为 1%。有很多原因会导致总体效率低下；从纯粹能量转化的角度考虑，光合作用能够达到的最高理论效率是 13%，但总会涉及其他降低总体效率的因素。第二个局限是植物仅有一部分可以食用，玉米仁和小麦胚乳都只占植物总质量的很小一部分，假定也是 1%。那么，食物生产的总体效率，就只有 $(10^{-2})^2=10^{-4}$，所以，满足太空站食品农业需求的总功率需求就是 $1.2\times10^6\text{W}\times10^4\approx10^{10}\text{W}$。利用光照常数计算，可得出光照面积 $A$ 需求为：

$$A=10^{10}\text{W}/1360\text{W/m}^2=7.35\times10^6\text{m}^2$$

由此容易看出，与农业种植的能量需求相比，其他方面的能耗显得不值一提。（假设太空居民的能量需求结构与当今美国居民类似）。要满足全部能量需求，人们可以把太空站面积在农业需求基础上略调高，达到 $10^7\text{m}^2$。如果太空站的形状是直径 2km 的圆柱体，其长度就需要达到 5km，才能满足能量需求。[B]这也相当于每位太空居民约 $1000\text{m}^2$ 的空间，才能种植足够维生的食物。做好此类估计的一个有趣参考，是麦克斯·克莱伯的小册子《生命之火》。书的副标题《生物能量学导论》，就是其内容的最佳注解。该书中的表 19.5 恰如其分地取名为：“每人每年所需的食物来源面积”。我们无视其中关于藻类（很可能是小球藻）的条目，会发现人类需要 $600\sim1500\text{m}^2$ 的面积来生产食物，如果想要吃到肉类和蛋类，就会需要更大面积。这与我在前文中的估计如出一辙[140]341。

当然，这只是对需要规模数量级的大致估算，而且也存在其他可选方案。比

如说，人们可以不用阳光直接照射农作物，而是利用太空站表面和附近的电池板发电之后，再使用白色 LED 灯照射植物。虽然在光能转化的每一步都会损失一些能量，但最终实现的利用效率可能还会高于阳光直接照射农作物的方案。因为阳光中的很多波段(如红外光)，对光合作用毫无帮助。通过将阳光集中在植物可用波段的方式，太空站居民有望提高他们的能量利用率。温家辉(Eric Yam)设计他的阿斯顿太空站时，就采用了这种方式。他使用的是自下而上的方式层层推进，方案包含众多细节。而本文采用的是自上而下的方式。不过，他设计方案中太阳能电池的总面积是 $3\times10^6\,m^2$，跟我在这里得出的计算结果非常接近。[C]

## 7.6.2 大气

*听说没？月球上新开了一家馆子，东西好吃得要命，就是没有空气。*

*——不知名人士的段子*

地球大气的成分包括74%的氮气($N_2$)、24%的氧气和大约2%的微量气体。地球表面的平均温度为288K左右，或者说15℃，地球海平面的大气压为 $1\times10^5\,N/m^2$。我会假设太空居民也需要同样的空气成分才能生存，尽管这一假设并无必要性。比如潜水者进行深海探测任务时，使用的就是不同的气体搭配(具体是氧气与氦气的混合物)。氧气是一种非常活跃的气体。太阳系的其他行星大气中都不含氧气，因为它太容易与其他气体和固体发生反应。火星上的氧分，多半都被困在地下，或以二氧化碳的方式存在于大气中。地球大气中含氧的原因在于生物活动。美国所有幼儿园都会告诉孩子们：地球上的动物吸入氧气，排出二氧化碳，而植物吸收二氧化碳，排出氧气。所以说，在我们的太空站里，植物不只要提供食物，还要担负为人类提供氧气的职责。科幻作家们早就注意到了这一点。例如在乔治·史密斯的短篇集《金星轨道站》系列中，工程师们就曾经面临过一次严重考验，因为新来的太空站首脑误听谗言，除去了飞船换气系统中的“杂草”，却万万没有想到，正是这些杂草在为太空站净化空气[222]。

我们必须想象，太空站有足够的庄稼和其他植被，足以满足其气体需求。让我们做一个不复杂的计算，看现有的植物够不够满足要求。计算有如下假设前提：

- 普通成年人每分钟呼吸20次。每次呼吸摄入的气体体积约为1L。
- 氧气的来源是植物光合作用，这一过程对尽是阳光的利用效率是1%左右

（与前一节的假设相等）。

- 太空站中的气压和空气成分与地球完全一致（74％的氮气、24％的氧气和大约2％的微量气体）。
- 太空站有10 000名居民。

根据我的计算，太空站上的植物每秒钟需要产生0.5kg的氧气才能满足人们的要求。（这个估计数值偏大，因为并不是所有吸入的氧气都会被人体吸收。）产生这么多氧气所需的能量，可以利用光合作用的化学方程式计算得出：

$$6CO_2+6H_2O+2870kJ \longrightarrow C_6H_{12}O_6+6O_2$$

这是一个吸热反应，意思是2870kJ的能量必须以可见光的形式输入，才能用6mol的二氧化碳和6mol的水得到1mol的葡萄糖。在此过程中，会生成6mol的氧气，而这些氧气可以供人类和动物呼吸。由于每摩尔的氧气质量为32g，通过光合作用生产氧气的能量代价就是$1.5\times10^7$J/kg。如果我们假定这一反应的整体效率还是1％。那么就需要$7.5\times10^8$W功率的光照，才能满足殖民地居民的呼吸需求。这大致相当于农业生产能源需求的6％。所以我们前文宽打宽算的能源预算依然够用。另一种表述方式是：每名太空居民需要大约50m$^2$的植被来供应他呼吸的氧气，但却需要1000m$^2$的植被才能提供足够的食物[D]。有趣的是，在小说《太空军官候补生》中，罗伯特·海因莱因为每一名人类提供的呼吸用植被面积却明显太小（10ft$^2$①，或1m$^2$）。正如我们和其他人的计算所表明的，这个设定差了大约两个数量级[110]。

## 7.7 项目估价

政府对高轨道设备制造业的兴趣，部分来自对经济回报的预期。根据相关计算，太空居民点可以为地球提供巨量能源。如果私人资本，乃至跨国公司的投资可以参与首座太空居民点的建设，就将获得很多倍的利润。

——杰拉德·K.奥尼尔 《太空边境》

从一开始，奥尼尔的太空站就打算成为经济上有利可图的投资项目。在计算成本过程中，他和当时的很多人一样，认为把人员送入太空的主要成本就是燃料。

① 1ft$^2$=0.0929m$^2$。

所以，他研究了多种不同的推进系统，比如从地球到月球运送物资的"轨道炮"。但当前的现实表明，燃料成本并不是太空旅行的主要成本项目。目前的大多数成本，都花费在了基础设施方面，而科幻小说家们在创作过程中，往往会大大低估此类支出。我觉得，奥尼尔很可能也掉入了同样的陷阱。他投资 300 亿美元建设太空站的计划，看来是对成本估计不足。即便是按照 1977 年的币值计算，也同样远远不够。现在，让我们用当前太空项目的实际支出水平，估算一下让太空站升空所需的费用。

罗伯特·海因莱因的小说《太空军官候补生》中有一座塔拉空间站，这是一座巨大的太空自治殖民地，围绕地球同步轨道运行。书中提到，这座空间站的质量是 60 万吨，也就是 $6.0\times10^{8}$kg 左右。根据前一章提到的数字，将 1 磅物资送入太空的成本约为 9000 美元，或者每千克近 20 000 美元。假设我们能把此项成本降低一个数量级，到每千克仅需 2000 美元，即便如此，把太空站送入轨道的成本也将高达 1.2 万亿美元。

这个数字看起来接近实际情况。温家辉的阿斯顿太空站计划方案中，估计设施建造费用为 5000 亿美元①，大约相当于美国年 GDP 的 1/20[11]。这个数字在我看来依然偏低。如果你仔细阅读温家辉的设计方案，会发现他一直在低估几个项目的执行成本。比如建造过程中的花费（包括在月球开采矿产资源的步骤），仅仅被估算为 220 亿美元。尽管如此，他的方案还是非常详尽，而如果阿斯顿太空站真有能够建成的一天，我绝对愿意住在上面。但首先，还是让我们本着吹毛求疵的态度细细审核一番，看这个项目到底值不值得投资。5000 亿美元投资，为期二十年，在利率 5%的情况下，相当于到期偿还给投资者 7900 亿美元。因为空间站共有 10 000 名居民，那么每人就需要在 20 年间偿付 7900 万美元的利润。或平均每人每年 320 万美元。这个数字并非不可实现，少数几家顶级科技公司，就能够实现超过这一水平的平均利润。现在我们来看温家辉的方案中关于太空站用途的设想，他的方案与其他参赛者在这方面没有太大区别：

- 开采月球上的矿产资源。这是预想中空间站的最主要用途。从地球同步轨道运送 1kg 物资到月球的能量成本是 $4\times10^{6}$J，而从地球直接运到月球的成本是 $6\times10^{7}$J。也就是说，人们建成了这个大型人造卫星之后，就能把运输活动的能量成本缩减 10 倍。如果考虑到火箭方程的影响，节减幅度就更大。现在的问题是，我们真的需要到月球采矿吗？对这个问题的回答，是月球采矿利于修建更多的空间站和更大的宇宙飞船，可是这些理由听起来相当牵强，像是个循环论证（计划 A 是为了计划 B；计划 B 又是为

① 此处原书中的数字为 5 亿美元。应该是错的，目前美国 GDP 数字为 16 万亿美元以上。

了计划 A)。

- 培养晶体。过去二十年间，这个理由已经成太空狂热者的万金油。他们总在说，人们在太空中可以培养出非常巨大而且完美的晶体，用于计算机工业。但是，这个建议却面临着两重质疑：首先，由于技术进步，人们在地球上也已经能够培育出非常大而且完美的晶体；其次，从同步轨道将这类晶体运回地球，要花费大量的代价。即便我们预期将来会出现太空电梯，运送成本依然会超过每千克 100 美元，甚至超过 1000 美元。据他们的估算，晶体培养占据太空站 GDP 的 9%，也就是说，必须在 20 年内实现 900 亿美元的利润；每年的任务就有 45 亿美元。这已经相当于美国整个半导体产业的年度利润总额，对一座小小的空间站来讲，预期未免过高。
- 建造大型太空望远镜和其他太空建设项目。同样，这些任务我们在地球表面也能完成，而且无须投入数额巨大的初期投资。
- 其他理由。这方面，阿斯顿太空站时计划方案显得非常幼稚，提出了一些诸如制造同态混合物、“绝对正圆”、医疗研究之类的事务。所有这些，都能以极小比例的成本在地面完成。设计者无非是在重述 NASA 于 20 世纪 90 年代初推崇“自由号”空间站的说辞。这套内容在当时毫无道理，现在依然是毫无道理。

以合理成本建造此类居住地的唯一办法，就是把运输成本降低两个数量级，到每千克运费数百美元的水平。我们下一章就将探讨人们提出的一种此类方案——太空电梯。

**注：**

A. 南北半球便池中的水因为科氏力影响而旋转方向不同的说法，只是一个非常流行的误解而已。

B. 此处我的假设是：太空站实际能够吸收光照的面积是一个长方形，长等于空间站长度，宽等于截面圆的直径。由于其表面浑圆，大多数吸收到的阳光都会是斜向照射过来的。

C. 阿斯顿计划赢得了 NASA 于 2009 年举办的太空城市设计大赛大奖。比赛每年举行一次，面向初高中学生征集太空站设计模型，尽管我对阿斯顿计划经济方面的可行性表示怀疑，但我觉得这个计划背后的物理学和工程学理念还是严谨的。

D. 另一种计算方法，是利用另外一个已知事实：在阳光和二氧化碳充足的条件下，植物可产生氧气的速度，是叶片面积 $20\times10^{-6}\,m/(m^2\cdot s)$[245]139,图6.4。从这个公式出发，得出每人需要 $178m^2$ 的叶面来产生必需的氧气，这比此前我做的概算多了 3 倍左右。不过，结论并没有本质上的变化：用于提供食物的植物，已经足够为居民提供氧气。

# 第8章

# 太空电梯

"……来吧，我们要建造一座城市和一座塔，塔顶通天，为要传扬我们的名。"

——《圣经·创世纪 11.4》

## 8.1 乘梯上太空

暑假到了，可是你已经受够了阿茹巴岛，又觉得东京太庸俗，甚至连南极的自然奇观都已经看腻。于是你上网预订了造访月球的旅程。行程的第一段非常简单：坐飞机去厄瓜多尔新建的太空中心即可。在太空中心附近的机场着陆之后，你却没能看见任何火箭发射装置。眼前只有一座巨大的圆形建筑，顶端有一条带子样的东西，一直向上到目不可及的天空中。你走过海关，在你的护照上盖了RIL(月球独立共和国)的入境许可证章，然后进入一套首尾相连的巨大房间，它们每个都是环形，有火车车厢那么大。每个房间都有小小的卧铺，正中位置是一座小小的咖啡馆，两端有观景区。你去了景观室才知道，就在刚才胡乱走动的过程中，你就已经到了高于地面1000ft的地方，而且还在持续上升！3天以后，你已经踏上了即将送你去月球的宇宙飞船——它所在的同步轨道，比地球表面高36 000km。

通天塔的概念像圣经一样古老，直到现在仍是人类野心与狂妄的标志。那

么，人类到底能不能修建出直通天空的高塔呢？康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基可能是第一个探讨此类建筑物理特性的人。在他的作品《地球与天空之梦》中，作者写道：

> 在这座塔中，随着人逐渐上升，他所受到的重力也逐渐减少……这是由于他正在远离地心，而离心力同时会渐渐增大。如果沿这样的高塔上升到34 000俄里（＝36 000km），重力就会消失。超过这个高度继续上升，那么重力还会逐渐加大，不过这一次的方向与此前相反[26]。

他的基本思路是：如果你能兴建一座足够高的建筑，那么就可以到达一个特定的高度，在这里，由地球自转产生的离心力的大小，正好能够抵消掉地球的全部引力。在这一高度被放开的物体将不会向地面坠落，而是停留在地表上空的同步轨道中，每24小时环绕地球一周。齐奥尔科夫斯基的本意，可能只是为了说明同步轨道的存在，而不是真的建议大家兴建这样一座建筑。但关于这座高塔的研究，还是在20世纪60年代展开。苏联的尤里·阿尔图萨诺夫和美国的约翰·伊萨克斯、休·布拉德纳、乔治·拜克斯从这个基本概念出发，分别独立提出了彼此相近的细节设想，并开始寻求真正建造高塔的工程方法[27,128]。一架送人进入太空的电梯，听起来的确有点疯狂，不过，这个计划有很多吸引人的地方。要真正理解这些可贵之处，我们就需要深入了解地球同步轨道。

## 8.2 地球同步轨道的物理学原理

如果你平常收看过卫星电视节目，可能就会好奇：那些帮你传输节目信号的通信卫星在什么地方。人们当然知道卫星挂在天上，可是具体在什么轨道上呢？这并不是什么傻问题，各种卫星沿种种不同的轨道绕地球旋转。上一章中我们曾提到，航天飞机以7km/s的速度运行在低空轨道，每90分钟环绕地球一周。

任何置身低空轨道的卫星，环绕地球一周所需的时间都将是90分钟，这个轨道非常不适合电视信号卫星。在地面上的人看来，低空轨道卫星总是一闪而过，几分钟后就已经不见踪影。电视信号接收器只能每隔一个半小时收到几分钟电视信号，这个输送效果未免太差。我们需要的电视卫星，是能够永远停留在

地面以上的同一个地点的类型，也就是说，它绕地球一周所需的时间正好是24小时。

在本书第6章，我们讨论过航天飞机轨道的物理特性。地球同步轨道卫星的运行方式跟航天飞机完全相同，只是轨道更高。我们重申一下，绕地轨道中的卫星飞行速度可以用如下公式计算得出

$$v=\sqrt{\frac{GM_E}{r}} \tag{8.1}$$

请注意，这一速度与卫星本身的质量完全无关。我们所需要的，是卫星绕地球一周所需的时间与其飞行半径之间的关系。这个关系也被称为开普勒第三定律。是天文学领域最有用的公式之一。如果 $T$ 是卫星绕地球一周所需的时间周期，那么：

$$r=\left(\frac{GM_E T^2}{4\pi^2}\right)^{1/3} \tag{8.2}$$

公式中的 $M_E$ 代表地球质量。解答过程中必须使用正确的单位：$T$ 的公制单位是 s，而 $M_E$ 的单位是 kg。从这个方程可以计算出以米为单位的轨道半径长度 $r$。代入 $T=24\text{h}=86\ 400\text{s}$，$M_E=5.9\times10^{24}\text{kg}$，$G=6.67\times10^{-11}\text{N}/(\text{m}^2\cdot\text{kg}^2)$。我们可以算。$r=4.2\times10^7\text{m}=42\ 000\text{km}$。这是从地心算起的轨道半径长度。大约在地表以上 35 600km(折合 22 000mile)。只需要运行轨道在地球赤道上空，这一高度上的卫星就可以始终保持在地表以上的同一位置。

如果我们采用非公制单位，就可以进一步简化上述公式。本书中我会经常使用这样的方法。做这类计算时，如果总是要用到很大(如地球的质量)或很小(如引力常量)的数字，会让人感觉很麻烦。更为实用的方案，是把星球的质量表示为地球质量的倍数，时间用天数为单位来计量，因为这些单位都常常被用来标示星球质量和卫星运行周期。在我们的太阳系，八大行星的质量最小为地球质量的1/100，最大为其300倍。所以，上述公式可以重写为

$$r=42\ 000\text{km}\times\left(\frac{M}{M_E}\right)^{1/3}\times\left(\frac{T}{1\text{天}}\right)^{2/3} \tag{8.3}$$

也就是说，质量用地球质量的位数表示，轨道周期用天数来表示。轨道半径的数值就等于 42 000km 乘以质量的立方根，再乘以运行周期平方的立方根。

## 8.3 何谓太空电梯，它有什么用？

想象我们有一颗地球同步轨道上的卫星，现在把它纵向拉长，同时非常注意上下两端的平衡，以至于它的质量中心始终保持在地球同步轨道上。如果我们一直都非常小心，或许就能把其中一端延伸到地面上。我们再把地面端固定，让另一端远远地伸入太空。基本上，这个就是太空电梯的雏形。有些作家称之为“同步轨道天钩”，有些称之为“豆茎”。齐奥尔科夫斯基称之为一座高塔，但事实上，它是从宇宙间悬下来的一根长索。它不会向地面坠落，是因为它的重心位于地球同步轨道上；它不会飘走，是因为它以完全同步于地球的速度旋转。这真的是一个极为大胆的设想，但人们对它已经有足够的信心，以至于愿意出钱资助严肃的相关科学研究项目，探讨如何将它建成[76,77]。

在科幻小说中，这也是一个相当热门的主题。我第一次读到相关内容，是在阿瑟·克拉克小说《天堂的喷泉》中，书中的工程师万尼瓦尔·摩根就试图建造这样一座“天梯”。其中的科学细节是最先进的，采用的基本材料是碳纳米管，我们下文中还将谈及。用这种材料制成的单分子细丝曾让摩根失去一截手指。故事的情节非常惊险刺激，在高潮部分，摩根为了解救几位被困在电梯上的乘客，不惜亲身犯险。查尔斯·谢菲尔德①的小说《星际之网》，也围绕这一概念展开。大卫·戈罗德的小说《星际跃迁》中，也曾出现乘坐电梯前往同步轨道空间站的情节[93,216]。创作网络漫画《xkcd》的漫画家蓝道尔·蒙儒也很喜欢这一计划。

一言以蔽之，太空电梯存在的最主要原因就是能源。理论上讲，利用太空电梯运送人员或者卫星前往同步轨道的成本，要大低于发射火箭的方式。要用火箭发射卫星，就需要在发射时达到极高的 7km/s 的初速度才能到达低空轨道；11km/s 的初速度才能到达地球同步轨道。这就要消耗大量的燃料和能源。事实上，由火箭方程就可以看出，很多能源都是被浪费在携带燃料的需求上了。而有了太空电梯，这类需求可以完全消失。理论上，你可以用任意慢的速度离开地球，因为它的自转就可以为你提供克服引力的动量。事实上，如果电梯从地表向上延

① 查尔斯·谢菲尔德（Charles Sheffield，1935—2002），数学家、物理学家、科幻作家。曾任美国航天学会主席、美国科幻与幻想作家协会主席。

伸的长度有46 000km(从地心开始算是52 000km),那么从顶端释放的卫星就能完全摆脱地球引力的影响。后面我们会测算太空电梯运送物资需要的能量值,与火箭相比,数额要小很多。但是,我们怎样才能建成这么高的建筑呢?

## 8.4 建筑如何挺立,因何倒塌?

房屋、桥梁和其他建筑,大致可以分为两种类型:一类是通过压力支撑,也就是被"挤"得矗立起来的;另一类则是部分或主要(但不是完全)利用拉力,也就是被"扯"起来的。如何建造一座建筑,取决于建筑材料的耐压和抗延展性能:有些材料非常耐压,但张力耐受性能差;另有些材料(如绳索和橡胶等)非常适合承受张力,但抗压性能不堪一用。石头就是非常耐压,但张力耐受性能差的例子。如果承受巨大的拉力,它们会易于折断。欧洲的城堡、埃及和中美洲地区的金字塔,都是完全依靠材料耐压性能的绝佳建筑案例。这种建筑通常是宽度大大超过高度,因而在遭遇强风和地动等冲击时,才不会从中间开裂。

通常的建筑,都会同时受到压力和拉伸力的影响。图8.1就是一个两种力量如何共同发挥作用的例子。以一个书架为例,上面放满了很重的书。书架搁板因受到书的压力而开始弯曲。由于弯曲,直接被书压到的部分被挤压,而另一侧被拉伸,而在搁板中央存在一个中间平面,这里的材料既没有被挤压,也没有被拉伸。通过这个例子可以看出,建筑材料弯曲可以同时造成挤压和拉伸的效果。在既耐挤压,又抗拉伸的材料中,木头是一个很好的实例。这也是它被广泛应用于某些类型建筑的原因。

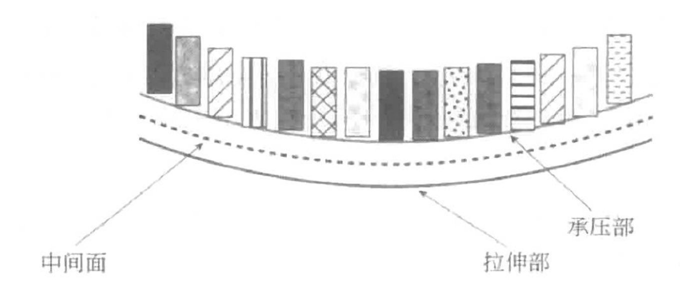



图8.1 书架搁板弯曲时的受力分析

尽管在摩天大楼和斜拉索桥的建设过程中,很多时候都要考虑张力的因素,但说到底,它们还都需要地面来提供支撑,也就是依然需要考虑压力因素。任何

接触地面的建筑，都需要至少一部分耐压支撑结构。但太空电梯却是一个例外：基本上，它就是一条很长的缆线或者绳索。因为悬空的绳索没有任何由材料挤压产生的支持力，只能完全依靠拉力来支撑。不过，它具体的支撑方式还有些复杂之处。

想象太空电梯中位于同步轨道之下的一段，比如，在地表以上 200km，与航天飞机同样的高度。正如前文所述，轨道越低，卫星停留在轨道所需的速度就越快。航天飞机只要 90 分钟就能环绕地球一周。但太空电梯的这个组成部分，飞行的速度却远远低于这个高度对应的轨道速度。如果对它不施加任何外力，它就会“想要”坠落到地球表面。制止它掉落的力量，来自太空电梯上紧接着的上面一截。根据牛顿第三运动定律，必然有一个向下的力，将上面一截电梯向下拉。与此类似，电梯处在地球同步轨道以上部分的运动速度，高于相应高度对应的轨道速度，因而倾向于离开地球飞走，要靠下面部分向下的拉力才能留在原处。综上所述，地球同步轨道以下的部分将电梯向下拉，而同步轨道以上的部分则把它向上扯。这就带来了内部张力。

太空电梯中的张力非常巨大。在本章末尾，我特别留出一个部分计算精确的相关数据。在这里，至少可以来一次草算，看看我们的建筑结构强度必须达到何种水平。如果我们想象一个“天钩”，下面悬挂一副长索，垂向地球表面。钩子所承受的力（用作长索承受拉力的近似值），就是它的“有效重力”，可以用以下算式得出：

$$T=Mg_{\text{eff}}=\rho g_{\text{eff}}LA \tag{8.4}$$

其中的 $L$ 是电梯长度，$A$ 是它的截面积，$g_{\text{eff}}$ 是建筑的有效重力加速度。对一根很短的线缆来说，它可以是地球的重力加速度。但是这里的线缆太长（正如齐奥尔科夫斯基引文中所说的），沿塔上行期间，$g$ 的实际值会渐渐减小，一旦越过同步轨道高度，方向就会反转。要计算这一数值会非常困难，但肯定会在 0 到地面重力加速度值之间。那么，我们先猜一个估计值，相当于实际加速度值的 1/10，也就是 $1\text{m/s}^2$。

我们感兴趣的参数，并不是拉力本身，而是线缆承受的单位拉力强度，其数值等于拉力除以截面积。

$$Y=g_{\text{eff}}L\rho \tag{8.5}$$

代入数值以后，如果我们把线缆长度设为 140 000km（原因参见下文），钢材密度设为 $8000\text{kg/m}^3$，最大拉力约为 $10^{12}\text{N/m}^2$。这个估计值是精确计算结果的 3 倍，但还是能正确说明问题。不幸的是，钢铁折断前能够承受的最大拉力仅有

$2.5\times10^{8}\,N/m^{2}$。低了大约4个数量级。钢材绝对是不能用的，那么能找到其他有用的材料吗？

## 8.5 拉力与耐力：碳纳米管

问题的严重程度，看一个预估的建筑高度就可见一斑。对任何一种材料，都可以借助以下算式得出其“断裂高度”：

$$h=\frac{Y_{max}}{\rho g} \tag{8.6}$$

其中 $Y_{max}$ 是材料断裂前（或明显变形之前）能够承受的最大拉力，也被记作材料的弹性限度。事实上，如果我们选用某种材料做成长索，将其挂在我们的“天钩”上，上式中的 $h$ 就是它被自身重量扯断时的长度。（这句话中的 $g$ 是取真正数值，而不是实际有效值）。对钢材来讲，$h$ 的数值约为 3km，或者说比我们的天钩必要长度短 50 000 倍。

要建造这样的结构，最理想的材料应该轻（为了减少自重）而且强韧。目前可选的最佳材料是碳纳米管纤维[207]。这是一种碳化合物，其分子链呈长管状排列，按每磅质量的承重能力计算，它比钢材强韧 100 倍以上。根据纸面数据和 $1g/cm^3$ 的密度值，可算出它的断裂高度为 1000km。如果我们打算用一根线缆建成太空电梯，这样的强度依然不够，但还有些其他方案，让建造容易很多。

目前为止，使用这种纤维的太空电梯最佳设计方案，主张采用一种锥状结构。地球同步轨道处最粗，向上和向下双方向逐渐变细[24,128,190]。这个锥形结构设计成整体拉力到处都一样的形式。其高度达到了惊人的 150 000km，几乎是到月球距离的一半。这种结构的优点显而易见：地球同步轨道的张力最小，因而最适合集合最大部分的质量。整个结构的形状，取决于其表面的斜率 $\tau$，也就是同步轨道处的厚度与地面厚度之比。数值可以用以下公式算出[190]：

$$\tau=e^{0.776R/h} \tag{8.7}$$

其中，$R$ 是地球半径。取 $R=6400$km，$h=1000$km。比值 $e^{6.4}=600$，也就是中部宽度需要达到两端的 600 倍。这并非完全不可能。但是我引用的这篇论文，为其纳米管选取的 $h$ 值是 2100km。因而其斜率是 10∶1。按照这种设计思路，加上碳纳米管的轻质特性，整个建筑结构仅有 150 000kg。其设计目的，则是让电梯能够运送 10 000kg 质量的货物。

这种碳纳米管目前所面临的问题是：还没有人造出过长度超过几厘米的此类材料。将它们硬生生延长至 15 万 km，肯定是一项艰巨的工程学挑战。而且很有可能出现的问题是：一旦将这么多条纤维合并，它所产生的合力根本比不上多条单根纤维的拉力之和。

## 8.6 能量、"轿厢"、激光和推进系统

电梯塔面临的另外一个难题，是在它建成以后如何将物品运输上去。目前的设计需要有"爬升器"，本质上就是能够自行爬上线缆的机器人。根据我们下文做出的估计可以看出，这种爬升器的能耗还是蛮高的。

如果仅仅考虑重力的影响，地球表面的任何物品都可以看成是坐落在一口深井的底部，要费很大力气，才能爬出井底。任何质量为 $m$ 的货物，当距离地心 $r$ 时，它的势能都可以用下列公式计算得出

$$U(r)=\frac{GM_{E}m}{r} \tag{8.8}$$

根据能量守恒定律可知，要把一个质量为 $m$ 的爬升器从地表送达地球同步轨道。就要求我们补足势能差额，也就是：

$$E=\frac{GM_{E}m}{R_{E}}-\frac{GM_{E}m}{r_{geo}} \tag{8.9}$$

我们不必担心货物的动能，因为地球自转的动量会通过高塔传送给货物。如果我们有 10 000kg 货物，需要提供的能量就是 $5.3\times10^{11}$ J。要提供这部分能量，一份 2001 年的设计方案主张用自由电子激光(FFL)将电力照射到爬升器上的太阳能电池上。其他主意还包括使用线缆传送的太阳能或电能等。不过，就算这些计划能够实现，还需要好好考虑下其间发生的成本。

首先需要说明的是：这一过程势必产生一定的能量损失。先来看使用激光的方案：首先，我们必须把电能转化为激光，这一过程的效率约为 10%。然后激光必须射向爬升器，被太阳能电池吸收，并再次转化为电能。目前能够买到的宽光谱商用太阳能电池的能量转化效率约为 20%。由于激光仅有单一的波长，就可以选用适当材料提高其能量转化效率。2001 年曾有一份报告声称，激光转化的效率可以达到 90%。但那份估计值来自此类电池开发者之间的私人通信。私人通信与经过同行检验的公开出版报告相比，其可信度当然更容易受到外界质疑，怀疑

其中有数据有夸张之嫌。科学文献中当然没有任何材料可以佐证那么高的能量转化效率。我就大方一点，算这一步的转化效率能达到60%，而电能转化为机械能(向上爬升的能量)的效率也是60%。那么整体效率就将是

$$e = 0.1 \times 0.6 \times 0.6 = 0.036(3.6\%) \tag{8.10}$$

所以，让这10 000kg货物进入同步轨道的能量需求就将是$E_{tot} = 5.3 \times 10^{11}/0.036 = 1.5 \times 10^{13}$J。假设每度电的成本是0.1美元，那么电力总成本就将是400 000美元，折合每千克40美元。这比当前利用火箭发射的每千克20 000美元成本便宜大约500倍。(上述报告估算出来的总成本是每千克500美元，不过这个数字包含了各方面的成本，不仅仅是燃料。)世上有这么好的事儿吗?

## 8.7 成功可能性有多大

建造太空电梯的最大难度在于——它实在是太长了。这时候，回顾一下人类建筑史，会有一些启发。从远古时代直到19世纪末，人类最高的建筑也不会超过150m，这主要是建筑材料(主要是石头)的性能所限。1889年建成的埃菲尔铁塔，将这一高度限界一下子提升了1倍。从那时起，人类建筑的最大高度就一再被刷新，新建筑使用钢铁和水泥作为主要建筑材料。本书写作期间，全球最高的建筑是阿联酋的迪拜塔，它高达818m(2680ft)。太空电梯会比它高150 000倍以上。

也许，我们上面所做的类比并不恰当。由于太空电梯是以拉力支撑的建筑，也许我们应该把它看作一条斜拉索桥。目前世界上最长的斜拉索桥也仅有2000m长而已，是太空电梯的1/75 000。太空电梯的长度，足以环绕地球四周之多。让我们来历数一下建成太空电梯需要达成的先决条件：

- 设计一种爬升系统。这应该是最简单的部分。太空电梯狂热者提供了一笔90万美元的奖金，奖给能以2m/s的速度爬升1km距离的爬升器。目前为止实现过的最佳成绩，是以1.8m/s的速度爬升100m。
- 开发用来传输能量的激光系统。1周内将10 000kg质量的爬升器送达同步轨道，要求激光发射器的平均功率达到2400kW(根据4.6节的计算结果)。这大大超过了迄今为止人们建造过的所有激光发射器功率。作为参照，杰斐逊实验室的自由电子激光发射器功率仅有14kW。尽管并没有什么障碍阻止人们建造功率更大的激光系统。

- 开发纳米纤维管技术。迄今为止人们开发出的最佳性能碳纤维，其弹性-密度比还是要比必要的程度低两个数量级。还有几篇论文显示，由于材料性能缺陷，这种纤维造成的长复合物难以达到必要的长度。要在未来 20 年内建成拉力足够的线缆，就需要每年把碳纤维性能提升 50%以上。
- 材料运送到位并建成线缆。2001 年的报告给出了一份详细的分析，探讨如何建成太空电梯。首先，强韧到足以支撑单一爬升器的纤维索将以同步轨道上的卫星为基点布设，随着纤维索长度加大，卫星轨道高度将逐步提升。这一步完成后，爬升器将沿途上行，并开始增加更多纤维索。最终将太空电梯加固到能够承受 $10^4$ kg 货物的强度。

除了开发这种足够强韧的纤维材料之外，上述步骤可以说都不是不可能实现的。问题是这要花多少钱，多久才能收回第一笔启动资金？最大的支出项目是材料费和安装费。与之相比，材料开发成本和卫星发射成本都是小数目。谷歌公司和日本政府都曾对完善相关设想投入资金。2008 年，日本曾有意投入 80 亿美元科研基金，来完善这一工程计划。让我们假设布拉德利·爱德华的预估准确，完成整个项目所需总金额为 300 亿美元。我再进一步假设整个太空电梯计划可以像它的支持者们鼓吹的那样，在 20 年内完成，而使用寿命也是 20 年。后者并不是支持者们的意见，但考虑到太空艰险的环境，应该是一个合理的假设。考虑到该项目的高风险物质，让我们假设融资利率是 7%，网上房贷计算器帮我算出的结果，是 40 年间的资金总需求将达到 900 亿美元。

在第二阶段报告的末尾，爱德华兹声称：太空电梯系统完全建成以后，每年将可以运送 1000t 货品进入太空，或者说 $10^6$ kg[77]。这个估计在我看来过于乐观。因为每批货物的质量是 10 000kg，按他的预计，每年就要完成 100 次运输任务，也就是三天完成一次。我个人的估计，要比他的预测低一个数量级，也就是每年完成 10 趟运输，总载运量 $10^5$ kg。在 20 年的运营寿命中，太空电梯可以向太空运送 $2\times10^6$ kg(约为 500 万 lb)货物。假设运货边际成本为目前公认的 250 美元，总成本大约为开发和建造成本基础上再加 10 亿美元。那么太空电梯的总投资额(含利息)约为 910 亿美元，大致相当于传统发射方式运送 200 万 lb 货物进入轨道的成本。前提是我们这些非常乐观的假设条件都能够实现。这样的效率已经非常了不起。当然，并没有达到狂热支持者声称的 99%成本节减。另外需要强调的是，我计算过程中所用的运力数据，大大低于报告作者假设的数据。

最基本的事实是：太空电梯是一个风险极高的投资项目，能比传统的发射方式提供有限的成本节减。如果传统发射方式的基础设施投入可以进一步减少，那么它在与太空电梯的对比中将占据更大优势。我曾经读到过一个说法，声称太空电梯将在人们不再嘲笑它之后的 20 年建成。现在已经没有人嘲笑这一创见，但它的实现，目前看来还是有些遥远。

## 8.8 太空电梯的精准数据

这个部分是给数学和物理学极客们准备的，你们可以参照这里的内容把本章的相关计算更精确地重做一遍。这里的演算参照了《美国物理学杂志》中 P. K. 阿拉文德的论文内容[24]。

对这一建筑结构进行分析的基础，是自由体受力图分析，任何规范的物理学课本中都有相应的内容，如哈立代、雷斯尼克和沃尔克合著的《物理学基础教程》。在独立个体的受力分析中，我们无须考虑其他个体，而单独分析整体中一个特定部分和受力情况。因为整个结构处于平衡状态，任何独立部分所受到的合力也应该是零。

让我们考虑太空电梯的一个部分，它离地心的距离是 $r$，本身长度是 $\mathrm{d}r$，$r$ 距离上的系统张力为 $T(r)$。这个部分总共受到四种力的影响：顶端和底端的拉力，倾向于将它拉扯解体；它本身受到的重力，方向向下；由于地球自转产生的离心力，倾向于将它向外推。我们可以将其写成：

$$\begin{aligned} F_{\text{net}} &= T(r+\mathrm{d}r) - T(r) + F_c - W \\ &= T(r+\mathrm{d}r) - T(r) + \Omega^2 r\rho A(r)\,\mathrm{d}r - \frac{GM}{r^2}\rho A(r)\,\mathrm{d}r \\ &= 0 \end{aligned} \tag{8.11}$$

其中，$A$ 是电梯结构的截面积（可能随高度有所不同），$\rho$ 是整体密度，$M$ 是地球的质量，$G$ 是通用引力常量，$\Omega$ 是地球自转的角速度（$=2\pi$/天$=7.3\times10^{-5}$ /s）如果我们将 $\mathrm{d}r$ 变成无穷小，公式可以改写为

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r} = A(r)\rho\left(\frac{GM}{r^2} - \Omega^2 r\right) \tag{8.12}$$

我们可以有两种方法解出这一方程：

(1) 通过将截面积表示成含 $r$ 表达式的形式。最简单的情形，是让截面积 $A$ 取恒定值。

(2) 通过给太空电梯内部张力设置数值条件的方式，比如，令整个结构中的拉力处处相等。

下面我会按照第一种方法解答方程，并把第二种留作网络习题。

这里的系统张力 $Y$，就是承受到的拉力值除以截面积。$Y=T/A$。所以，我们可以将上式改写为

$$\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}r}=\left(\frac{GM}{r^2}-\Omega^2 r\right)\rho$$

在地面高度，$Y(R)=0$，其中的 $R$ 等于地球半径，方程可以用积分方式求解

$$Y(r)=\left(\left(\frac{GM}{R}-\frac{GM}{r}\right)-\frac{1}{2}(\Omega^2 r^2-\Omega^2 R^2)\right)\rho \tag{8.13}$$

最大张力出现于半径长度等于地球同步轨道高度的位置。

$$r_{\text{geo}}=\left(\frac{GM}{\Omega^2}\right)^{1/3}=42\ 000\text{km} \tag{8.14}$$

张力最大值为

$$Y_{\max}=\left(\frac{GM}{R}+\frac{1}{2}\Omega^2 R^2-\frac{3}{2}(GM\Omega)^{2/3}\right)\rho \tag{8.15}$$

使用地球的相关参数和 8000kg/m$^3$ 的密度（对应钢的密度），最大张力为 $1.2\times10^{13}\text{N/m}^2$。

# 第 9 章

# 载人星际航行

## 9.1 这不是坐飞机,更不同于航海

在罗伯特·海因莱因的小说《火星人波特凯》中,同名女主人公从她在火星殖民地的家里出发,踏上一段三地巡游的旅程,途经金星和地球,最终再次返回火星。她所乘坐的飞船"三尖盔"号,实质上就是在太空中行驶的一艘轮船。船上有奢华的餐厅、一座舞厅,以及头等舱、二等舱和统舱(三等客舱)。书中详细描述了飞船的种种细节。就像海因莱因的其他作品一样,这部书中的科学部分也表现不错。其中最远离现实的部分当数"火炬"推进器。这东西基本上就是一台质能转换机,有了它,飞船就可以在行程中的大部分时间为自己提供加速的动力。即便如此,仅是前往金星的旅程,还是要花掉长达几个月的时间,因为星球之间的距离的确太远了。

其他小说中,这类旅行也随处可见。很多作品中都描述了拥挤船舱中的漫长旅程,有些情节就是从由此产生的倦怠情绪中滋生出来的。在阿瑟·克拉克作品《2001:太空漫游》中,"发现号"5 位船员中的 3 位都必须处于休眠状态,因为在长达数年的航程中,飞船上的生命支持系统不足以满足 2 名以上船员的需求。(小说中的飞行目的地是土星的卫星,电影中的目的地是木星)。也就是说:前往低空绕地轨道需要几个小时,前往月球需要几天;而就算是距离最近的行星,去一趟也要花费几个月乃至几年时间。即便是在科幻小说里也是这样(至少是在追求科学细节精确的小说中)。为什么呢?

这么说吧：这是由两个互相关联的因素决定的：距离、重力。在距离最近的时间点，离我们最近的行星——金星到地球的距离为 4000 万 km，或者说比月球远 110 倍。火星就更远了。它与我们最近时，距离地球也有 7800 万 km。阿波罗计划中的宇航员花了 3 天时间到达月球，如果用同样的速度，他们将需要近一年的时间才能到达金星。

另外一个需要考虑的因素是重力。原因在于：太阳系所有的行星都在围绕太阳转动，它们在各自轨道上的运行都必须遵循万有引力定律，而从地球飞往其他行星的任何飞行器也将受到万有引力的影响。在太空船由地球飞往火星的过程中，它实质上就是一颗环绕太阳运行的小行星。也就是说，你不能简单地把它对准火星，然后发射：因为火星一直都在围绕太阳的轨道上运转着。就算你设法让飞船沿直线飞行，等你到达预定位置之后，火星也早就飞到别处去了。而你发射的火箭，也不会真的沿直线飞行，正如我已经指出的，它在本质上是一颗环绕太阳运行的小行星。

## 9.2 开普勒三大定律

我们首先需要理解行星环绕太阳飞行的方式。约翰尼斯·开普勒率先提出了关于行星轨道的三大定律。他把这些定律当作基于观测数据的经验总结来阐述。但后来的牛顿却证明，开普勒的三大定律，其实都可以看作是万有引力定律的特殊表现形式。这些定律的推论相当复杂烦琐，可以在任何天体力学书籍中查到。例如《天体力学导论》[31]等。

开普勒第一定律。行星运行轨道的轨迹为椭圆，太阳所在的位置是椭圆的焦点之一。这对有些人来讲非常意外，它们以为行星围绕太阳的轨道是正圆形。事实上，人们把正圆形当作“完美”形状的信念是如此强烈，以至于在数千年间，天文学家们都认为行星的轨道必须是正圆形，就算有调整，也只能是沿着正圆轨道上的点再作正圆形运转。而椭圆是这样一种形状：在硬质平面上固定两颗图钉。用一根绳子拴在两颗图钉上，并使绳子松弛。然后取一根铅笔，用铅笔把绳子扯直的情况下，把图形画在平面上（如图 9.1 所示）。椭圆的形状看起来就像是被踩扁的圆。椭圆的焦点就是两颗图钉的位置。有趣的是，并没有什么简单的办法来寻找已知椭圆的焦点。理查德·费曼曾做过一个讲座，期间展示了不用微积分求取椭圆形焦点的方法。可是他的几何推演过程，虽然使用的数学手段“初级”，却比

使用微积分的常用解法更为繁复。另一个有趣的事实是：虽然太阳是在椭圆的一个焦点上，但在另一个焦点的位置，却没有什么特别的东西。

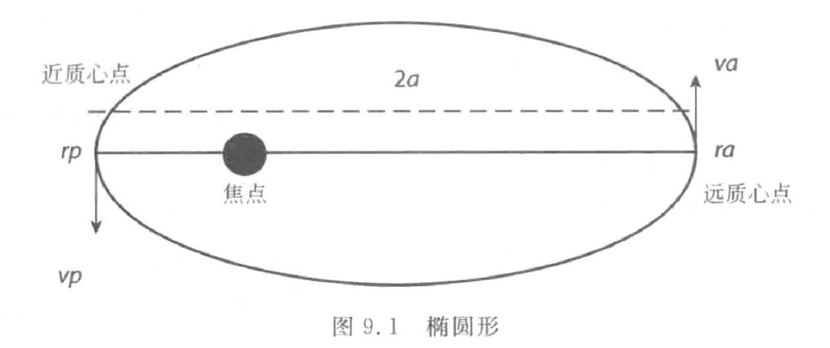



图 9.1　椭圆形

三个有用的定义：椭圆长轴方向的一半长度被称为"半长轴"，较短方向的一半称为"半短轴"，而它的"偏心率"被定义为

$$e=\sqrt{1-\left(\frac{b}{a}\right)^2} \tag{9.1}$$

偏心率越大，椭圆就越扁长。你大约已经猜到了，偏心率等于零的椭圆，就是正圆。

开普勒第二定律。如果我们沿着从行星到太阳的方向画一条直线，并让它扫过一个扇形平面，那么扇面面积增加的速度是固定的。另一种表达形式是：同样时间内，轨道扇面扫过的面积相等，如图 9.2 所示。根据面积计算公式可以得知，行星在距离太阳更近的位置时，运行速度也更快，于是在同样的时间内，行星与太阳之间的直线扫过的角度，要比它距离太阳更远的时候系统更大，这样才能有相等的面积。

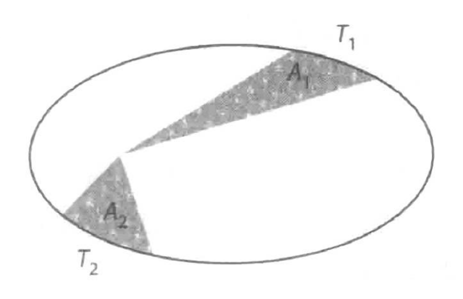



图 9.2　开普勒第二定律：如果时间 $T_1=T_2$，则面积 $A_1=A_2$

开普勒第三定律。在前面的第 6 章和第 8 章，我们已经认识了开普勒第三定律。我将不会展开来细讲天文学家惯用的定律形式，因为它比物理学家们习惯的形式更简单。从根本上讲，简化问题的最大窍门就是选用适当的计量单位。我在第 8 章已经用过一次这样的办法，在当时计算轨道高度的过程中，我们使用了轨道周期和对应行星的质量为单位。当时所用的时间单位是天，质量单位是地球质量的倍数。因为行星运转的中心是太阳，这里我要使用的时间单位就将是年，质量单位也将是太阳的质量($1.99\times10^{30}$ kg)，因为恒星的质量与太

阳较为接近。此外，我将不严格按照开普勒的理解阐述这一定律，而仅仅把它看作是牛顿万有引力定律的一个引论。

首先，我们来考察一颗沿着椭圆形轨道环绕太阳运转的行星。它与太阳之间的距离存在一个平均值 $a$，我们可以证明它的大小等于椭圆形的半长轴。我们将以"天文单位"(AU)为单位，计算 $a$ 的数值。而所谓"天文单位"，就是从地球到太阳的平均距离($1.5\times10^8$ km，或 9300 万 mile)。行星环绕太阳一周需要一定的时间，我们将其记作 $P$。对 $P$，我们将采用年为单位。这样一来，地球的平均距离就是 $a=1\text{AU}$，$P=1$ 年。而火星的相应数值分别是 $a=1.52\text{AU}$，$P=1.88$ 年。

我们需要的最后一项数据是恒星的质量。它是一切行星、卫星和宇宙飞船共同围绕飞行的中心点。我们将其记作 $M$，并把我们星系的恒星(太阳)的质量记为 1。我这样做的原因，是为了简化公式。一旦有了形式简单的公式，将其化为公制单位就会非常简单，一步就可以完成。总之，利用上述数据，开普勒第三定律认为，对围绕质量为 $M$ 的中心点运行的卫星而言：

$$\frac{a^3}{P^2}=M \tag{9.2}$$

如果我们遇上两个物体，其质量非常接近，又彼此围绕旋转，那么上述公式就要经过一点调整才能使用(后面我们还会讲到)。

对行星或其他任何飞行物而言，只要它受万有引力影响，并环绕太阳运行，就会满足下列等式：

$$a^3=P^2 \tag{9.3}$$

因为在式(9.2)中的 $M$ 值等于 1。

如果要规划前往其他星球的简单航行路线，我们需要了解的，也不过就是上述这些知识。

## 9.3 霍曼转移轨道

让我们想象一次从地球到火星的旅程。真正的太空旅行与影视作品中的描述大相径庭：在大多数电影和电视作品中，宇宙飞船的发动机都是始终保持开启状态，跟飞机和轮船一样。但事实上，这并无必要，而只会浪费燃料和能源。飞机发动机一直开启，是因为存在空气阻力。如果发动机停止，不一会儿飞机就会坠毁到地面上。

但太空中的状况却并非如此。真空环境下的阻力非常之低，以至于航天器返回过程中的最大考验，反而是设法让它脱离轨道返回地球！如果置之不理，它们能够自动环绕行星飞行多年，乃至几个世纪。星际航行更加如此，因为那里的状况更接近于绝对真空。一艘进入环太阳轨道的飞行器，有望在轨道停留长达数十亿年的时间，就像八大行星一样。^

要让宇宙飞船从地球到达火星，我们可以试着让它进入环绕太阳的轨道，并使它的轨道与地球和火星轨道相交。其中最简单的例子当数霍曼转移轨道，或称为双切线轨道。最早提出这一轨道设想的人是沃尔特·霍曼，其观点出现于他在1925年发表的著作《论登陆天体的可能性》。NASA于1961年的翻译版本可以在网上免费下载[124]。本书中，我会把地球和火星轨道近似地看作正圆形，其半径分别为1.00和1.52天文单位。我还将假设所有轨道处于同一平面。上述这些假设没有一个是正确的，但都跟实际情形非常接近。两轨道的偏心率分别为0.0167和0.0935，而火星轨道面相对于地球轨道的倾角仅有1.85°。(上述所有天文数据均来自《21世纪天文学教程》一书中的附录4[130])。要让宇宙飞船从地球到达火星，我们让它进入一个在近日点与地球绕日轨道相切的轨道，并在火星远日点与火星轨道相切。图9.3展示了霍曼转移轨道的几何学属性。

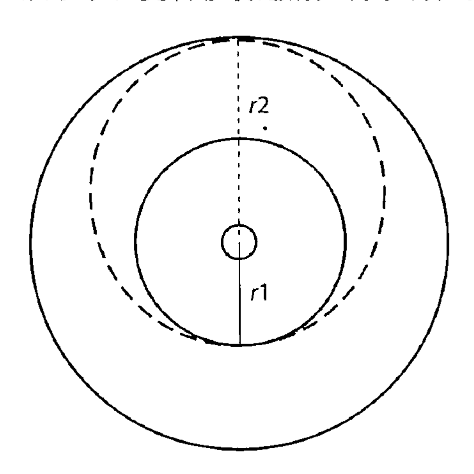



图9.3 霍曼转移轨道

下一节我们会讲述如何进入这一轨道。暂时我们只需要假设，我们已经了解了关于轨道的一切信息。例如，行程时间是轨道周期的一半，根据开普勒第三定律就可以得知：飞行器椭圆轨道的半长轴是两颗行星轨道半径的平均值，也就是1.26AU。公转周期也就是 $P=1.26^{3/2}=1.4$ 年。也就是说，前往火星的旅程所需时间为0.7年，或255天。

## 9.4 $\Delta v$ 及其他

太空飞行的大部分时间里，宇宙飞船的发动机都处于关闭状态。这是因为，在大部分旅程中，它都是太阳的一颗卫星。原则上，在整个向外航行的过程中，只有两个时间点需要消耗能量：一次是脱离地球轨道；一次是进入火星轨道。原因在于：宇宙飞船需要超过地球公转的速度，才能脱离地球进入预定轨道。而在到达火星轨道时，它的初速度又低于火星公转的速度，需要加速才能跟上。这两个时间点，宇宙飞船都需要消耗燃料来改变速度。这样一来，就引入了“$\Delta v$”的概念，也就是修正轨道所需的速度变化幅度。

为了得到这个数值，我们就需要考虑近日点与远日点两处的宇宙飞船速度。计算过程中会用到两个等量关系，一是能量守恒，二是角速度恒定不变。我会省掉烦琐的计算推导过程，直接告诉大家答案。在地球近日点，宇宙飞船的速度应为

$$v_p=\sqrt{\frac{2GM_{\text{sun}}}{r_p}\frac{1}{1+r_p/r_a}} \tag{9.4}$$

而在火星远日点，速度应为

$$v_a=\sqrt{\frac{2GM_{\text{sun}}}{r_a}\frac{1}{1+r_a/r_p}} \tag{9.5}$$

其中的 $M_{\text{sun}}$ 是太阳的质量；$r_p$ 是近日点与太阳之间的距离；$r_a$ 是远日点与太阳之间的距离；此处应注意，我们必须始终使用公制计量单位，才能得出正确的计算结果。（不过这样做的好处是，我们的公式适用于环绕任何恒星的任何飞行器轨道计算。）代入数值 $v_p=32\ 670\text{m/s}$；$v_a=21\ 495\text{m/s}$。请注意，飞船在近日点的速度，大于地球在其轨道上的速度（297 500m/s）。而它在远日点的速度，小于火星在其轨道上的速度（24 100m/s）。这是我们需要使用燃料的两个时间点。$\Delta v_p$ 表示在近日点使飞船进入霍曼轨道所需的速度变化幅度；$\Delta v_a$ 表示在远日点使飞船进入火星轨道所需的速度变化幅度。

$$\Delta v_p=2925\text{m/s},$$

$$\Delta v_a=2633\text{m/s}。$$

乍看上去，这里的数据不算糟糕，$\Delta v$ 数字比地面发射飞行物进入地球同步轨

道所需的值还要更小(后者大约为 7000m/s)。事实上,前段得出的两个数值,跟普通化学推进器的喷气速度大致相当。使用第 6 章的火箭公式可以得知,我们需要大约 2.8 倍的燃料载荷比来让宇宙飞船达到这样的速度。为简化计算,我会把数字上调为整数 3。也就是说,要发射有效载荷 10 000kg 的飞船,加上燃料之后的质量就要达到 30 000kg。但前提是,我们仅仅考虑了一次轨道转换。

问题的难处在于:当进行载人航天项目时,我们需要完成的轨道转换次数是四次,出去的时候两次,返程路上还要两次。因此导致的载荷质量比增加幅度是累积的。如果一次轨道转换对应的载荷比是 3 倍;两次就是 $3^2=9$ 倍;三次是 $3^3=27$ 倍,以此类推。如果我们不假设宇航员能在火星当地获取燃料(后文对此还有更多阐述),最终得到的质量载荷比就是 $3^4=81$ 倍。这依然在可实现的范围之内,10 000kg 有效载荷对应 810 000kg 的飞行器质量。但是,如果再考虑上发射时机选择,问题就会更加复杂。

另外一个需要考虑的因素,是我在前文一直假设宇宙飞船从与地球公转轨道重合的起点出发。但这样做的问题是,地表飞行器要进入上述轨道,就要先摆脱地心引力的影响,这本身也是一个代价相当高昂的转轨过程,速度变化幅度约为 11km/s。暂时我会无视这一因素,但无论是这个,还是其他将飞行器送入火星轨道所需的速度变化因素,最终都需要考虑在所有的载人火星考察任务中。[B]

## 9.5 返程问题

不言而喻,用上述方法发射飞行器,必须赶在行星相对位置最适合的时机才可以。要让霍曼转移轨道成功帮我们登陆火星,就必须确保在旅程结束时,火星正好能出现在最恰当的位置。也就是说,在旅程终点,火星的位置正好在与发射时的地球隔着太阳相望的地方。

其背后的数学计算略微有点儿复杂。但我可以给出自己算过的结果:这样完美的排列,每隔 26 个月才能出现一次。当然,也没有人强制规定,说你必须使用双切线轨道。但采用能量消耗最小的路线,终归是个比较合乎理智的选择。不过到达火星之后,你要是还想回来的话,就得再等下一次行星排列最理想的时机。也就是说,探索火星的人们不只要撑过 255 天的行程,还要在火星坚持一年以上的时间,以等待返回时机出现,然后再熬过同样是 255 天的归途旅行。换言之,他

们总共需要坚持 3 年以上的时间，其间不是在乘坐飞船，就是停留在火星表面。这样你应该就能明白，为什么发射无人探测飞船的难度会低很多。因为我们既不需要担心维持机器的生命，也不用确保它们能够安全返回。与载人项目相比，发射火星探测器这类任务规模小得多，必要载荷轻得多，能量效率高得多，成本也就低了很多很多。载人火星探测项目的成本，会超过 100 亿美元，甚至可能超过 1000 亿美元，其中最大的考验就是保证宇航员活着返回地球。当然，最近已经有人开始主张进行单程载人火星登陆项目，送去的宇航员将在火星度过余生，这样就不必再考虑回程需要。在当前技术条件下，此举并不可行，只能被当作相关“殖民者”的慢性自杀而已。

## 9.6 引力弹弓效应和混沌轨道

我在上一小节中提到，霍曼转移轨道是成本最低廉的轨道，但这个论断却并非绝对严谨。只有在无视沿途相关行星引力，而仅仅考虑太阳引力的情况下，霍曼转移轨道才称得上成本最低。这样简化后的情形，在物理学上被称作两体问题。我们仅仅考虑太阳和飞行器，在这种假设体系下，飞行器可以沿着完美的椭圆形轨道运行，就像开普勒定律影响下应该出现的情况一样。但是，开普勒定律有效的前提条件，却是我们能够完全忽视沿途行星引力的影响。

在第 7 章，我曾提出过三体问题的一种解决方案，也就是选用地月系统中的几个拉格朗日点。这些点的存在，反映了其所属系统的轨道周期性。但还有另外一种利用系统中第三个天体的方式，那就是通过贴近飞行的方法，借用其引力影响来改变飞行器轨道，这一方法也被称为“引力弹弓”方法。因为引力场不只是能够改变飞行器的方向，还可以改变其飞行速度。人们可以利用这种方式，来降低星际航行的燃料成本。使用此种方法的最著名案例，就是 20 世纪 70 年代末实施的两颗旅行者卫星探测项目。这两颗探测卫星的运行路线就像是桌球一样，总是从几颗地外行星的旁边被“弹开”。之所以要利用这些引力场，就是为了用仅仅两颗卫星，探测尽可能多的地外行星。这一项目的另外一个额外收获，就是让卫星超过了太阳系的逃逸速度。尽管速度还不算很快，但它们已经成为了名符其实的星际旅行者。

下面就是“引力弹弓”的基本原理：在飞行器围绕太阳公转的同时，我们对其

运行线路进行必要的设定和调整，以使它能够经过围绕太阳的行星或小行星附近（也就是距离少于数百万千米）[C]。利用行星或小行星的引力影响，改变其原来的飞行方向和速度。这一操作将在极短时间内完成，短到在此过程中，我们暂时可以只考虑行星和飞行器的运行线路。我们可以临时无视太阳引力的影响，假设在此期间，行星与飞行器都沿直线运行。在科幻小说中，最有趣的此类范例出现于拉里·尼文的作品《保护人》中。书中的不列农怪兽利用了一颗中子星的引力场，在太空中完成了一次90°转向。这个例子的有趣之处在于，转向过程是在相对论性速度下完成的，我会在本书后面讲到这个更为复杂的主题，目前还不想引入太多复杂的概念。

我将只讨论一个非常简单的情形，然后把更复杂的案例留到习题部分。我们计算飞行器最终路线所需要的输入数据，少到了惊人的地步。在我们的简单例子中，我们假设飞行器原来的飞行方向与行星恰好相反，然后围绕行星180°转弯，最后朝向与原来相反的方向飞走。假设行星本来的运行速度是$V$，而航天器的速度是$v$，绕过行星之后，飞行器的速度将会是$v'=v+2V$，结果来自势能与能量的转换，而与转向操作的细节无关。我们只需要了解事先和事后飞行器的速度，以及它相对于行星的运行方向就够了（如图9.4所示）。

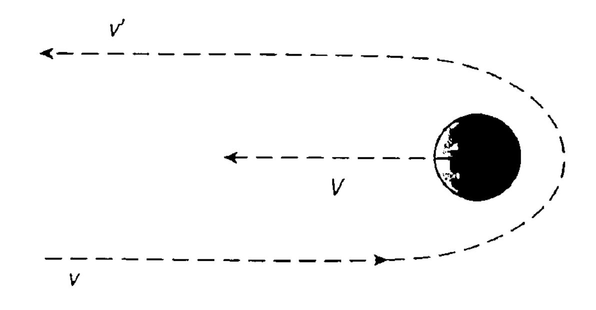



图9.4 利用弹弓效应转向

这种操作的高明之处在于：如果行星在圆形轨道运行，那么它本来的速度就已经达到了太阳系逃逸速度的70%。因此，当上述转向完成以后，飞行器就已经超过了太阳系的逃逸速度，以至于能够彻底离开太阳系。理论上，我们可以利用这种方式，把飞行器送往太阳系中的任何一个角落。当然，最大的限制因素就是需要让各大行星在正确的时间出现在正确的地点，然后我们才能达到目的。两颗旅行者卫星发射的时机，正好是在一个难得的时间窗口，让人们能够在一次发射之后，数次利用行星引力场投射。但是，那么有利的行星排列情况非常少见。

在从地球到火星的旅程中。一个可资利用的“第三者”就是月球。它有几个不错的属性：首先是个头足够大，也就能有强大的引力场；跟火星相比，它的距离很近，我们无须浪费太多燃料就可以到达；月球上还没有大气，经过其附近的飞行器，可以俯冲到非常接近月球表面的高度。这就是迪斯尼乐园明日世界原型社区(EPCOT)中“火星之旅”项目的理论基础。

利用第三天体的另一种方法，就是加强型引力弹弓(图 9.5)，以此来增大飞行器的运行速度。这种情况下，飞行器不仅仅要靠近行星飞行，而且会在与行星最为接近的位置(近质心点)变速。这样可以大大提升引力投射的加速效果。我们假设飞行器原来的速度是 $v$，并在距离行星很远的位置就开始加速，速度变化幅度为 $\Delta v$，方向与其原来的飞行方向一致。那么飞行器的新速度就是 $v'=v+\Delta v$。而在它距离行星很远时，如果其速度为 $v$，到达近质心点的时刻，其速度就将是：

$$v=\sqrt{v^2+v_e^2}$$

其中的 $v_e=\sqrt{\frac{2GM_p}{r}}$ 是质量为 $M_p$ 的行星对应的逃逸速度(与其质心相距为 $r$ 时)。如果在近质心点，仍作出数值等于 $\Delta v$ 的变速，那么当飞行器远离行星时的速度就将是：

$$v'=\sqrt{v^2+2\Delta v\ \sqrt{v^2+v_e^2}+\Delta v^2}$$

其数值大于 $v+\Delta v$，[D]可以利用行星引力来增强 $\Delta v$ 的变速效果。

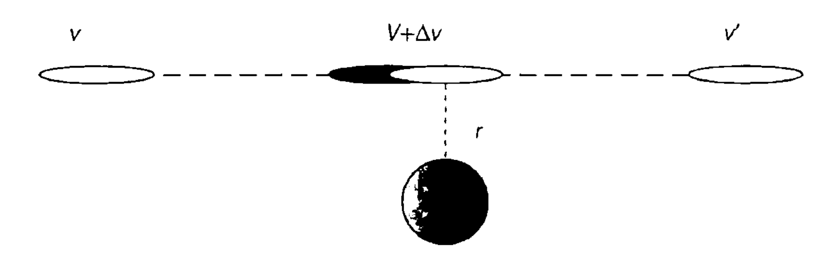



图 9.5 加强型弹弓效应

20 世纪 80 年代后期，爱德华・贝尔布鲁诺曾指出，至少在从地球到月球的航程中，存在那样一类被他称作“混沌轨道”的轨道，在其设定过程中计入了月球和太阳引力的影响。利用这些轨道从地球向月球发射宇宙飞船，消耗的能量比利用霍曼转移轨道低好几倍。为此需要付出的代价，是航行时间漫长了很多。需要大约 1 个月的时间，而不是通常的 3 天。1990 年，日本就利用这种“混沌轨道”将“飞天”号探测器从绕地轨道送上了月球。

不幸的是，所有这些节省燃料和能源的招数，在降低载人航天的另一个关键成本因素方面都毫无建树：它们都未能缩短航行时间。如果我们想要利用能源成本较小的轨道送人类去其他行星，轨道的力学特性就将迫使我们承受长达数年的航程。因此，我们就必须面对让人类在太空存活数年之久的艰巨任务。正如第4章列举的数字所表明的，这将花费巨量成本。正因为这个，前往火星或更远距离的太空探索任务，才没有一次属于载人类型。

## 9.7 成本问题

人们肯定会再次提出疑问，航天收益到底值不值得投入那么高的成本？20世纪50至60年代的科幻小说家们，写到探索火星时眉飞色舞，就好像它只是地球上另外一片未探索的处女地，像中南美洲的黄金国一样等待勇者前去征服。不过，我们还是回到现实中，看看火星表面的状况到底怎样吧。

火星表面的温度，跟地球上的南极地区大致相当。空气稀薄到了称其为毒气都嫌勉强的地步。在火星"海平面"，大气压也仅能与珠穆朗玛峰顶部相当。而空气的成分也完全不能满足人类呼吸需要，其中主要都是二氧化碳。火星表面的水非常之少，而且主要以固态形式存在于两极地区，而且连这些地方的冰层，主要成分都还是凝固的二氧化碳。有证据表明，数十亿年前，火星表面曾有过大量的液态水，但现在早就没有了。火星上连有细菌生活的可能性都非常小。我们已经几度发射无人探测飞船前往火星，至今都没有发现生命存在的迹象。

没有防护装置的情况下，没有人能够在火星表面存活。防护装置要帮助人们保持体温，并供给氧气。如果宇航员要在火星生活几个月，它们只有两个选择。要么待在围绕火星运行的轨道飞行器中，让机器人进行实地考察；要么就是登陆火星表面，建造可以供人类居住的基地。我们早就已经在使用机器探测火星，到围绕火星的轨道上进行操控，唯一的优点只是反应时间变快（大约1s，从地球这边操作，最近距离时的反应时间也有4.3min）。我并不认为，为了这么一点点收获，就值得多投入100倍的成本。

如果宇航员要登陆火星表面，问题就变成了他们能做哪些机器人无法做到的事情？这点非常重要，因为他们毕竟要费尽心机建造一个能供人类居住的基地。在前面的章节，我们已经探讨过在太空中复制地球环境的成本。任何基地的成

本，可能都会高达数百亿美元，而且我们没有任何可靠的方法估测基地的耐用性，不可能事先知道它能不能为勇敢的探险者提供可靠支持，帮他们度过需要在其中居住的漫长时期。

载人飞行的方方面面都非常复杂。但在1940—1980年间，乃至以后的时间里，多数科幻作者都预言了太空殖民地的存在。它们或者在火星，或者在气态巨星的行星上。例如罗伯特·海因莱因的作品《太空农夫》，就假设人类改造了木星的卫星盖尼米德（木卫三），用于种植农作物，来养活人口过剩的地球。更近期的作品中，无论是《星际迷航》衍生剧集，《巴比伦五号》系列，还是原版与翻拍的《太空堡垒卡拉狄加》系列，都隐含着人类必将走出地球，跨入太空的信条。这个传统的假设已经融入了科幻作品的血液中。但它毕竟是"机器人崛起"之前时代的产物。那时候没有人可以想象到，作为现代无人太空探索基础的机器计算能力，能够进步得如此迅速，价格还能如此低廉。目前人们还无法断定，到底有没有什么任务只适合人类去做，而不能使用机器更快更好更廉价地完成。至少已经有作者声称，载人航天的理念"太落伍"了。从纯科学的立场来看，我觉得这种说法有道理。载人星际航行成本太高，而其收益却不足以证明此类任务实施的必要性。

大部分读者可能会预期，下面我会重启一节，大肆宣扬载人航天在科学视角以外的重要性：探索未知世界的巨大满足；人类历史要想不陷入停滞，就需要最新的边疆；人类如果仅仅局限于一个星球，就可能被一场灾难彻底灭绝，等等。这些都是不错的借口。但在我们找到新的离开母星球的办法之前，在我们有能力在太空拓建宜居环境之前，载人星际航行的目标依然不可能实现。我想打个比方：当前我们面对载人航天问题的处境，就像查尔斯·巴比奇在19世纪60年代面对机器计算问题的处境一样。他发现了现代计算机的基本原理，然后就试图用那个时代的技术来实现他的设想。但当时整个社会的技术水准就是太低了一点点，以至于他的分析机就是无法建造成功。我们当前的处境也像当时的他一样：使用化学燃料的火箭，喷气速度仅有数千米每秒，堪堪能够把无人探测器送往太阳系其他行星，但在载人项目方面，则毫无用处。在下一章里，我们会讨论几个速度更快和备选替代方案。

**注：**

A. 引用一段歌词，来自"莫须有巨人"乐队的《尖齿鞋拔子》："我跟随重金属乐队/把整个世界周游/它们耗尽了燃料/飞机就永远飘流"。这套词儿用来说飞机显然不对，说宇宙飞船却是对的。

B. 要得到完整的计算过程，并考虑上地球和火星的逃逸速度，可以参看阿瑟·斯蒂纳和约翰·博高雷的论文《前往火星》。这篇论文的一大缺陷是作者们对燃料成本的估算有误，他们没有使用火箭方程，而是简单假设燃料成本与飞船的动量有关。

C. 严格来讲，这是一个"撞击问题"。尽管飞行器与行星实际上并没有相撞(至少我们不希望它们撞上)。最早提出这一观点的可能是斯坦尼斯拉夫·乌拉姆，出现于它的《洛杉矶报告》LAMS-2219 中[75]25~26,[240]第9章。

D. 这里表面看上去自相矛盾，而且也违背能量守恒定律。实际情况是，飞行器在接近行星过程中，会不断失去重力势能。在靠近行星的地方燃烧燃料，你不只是获得了燃料中蕴含的能量，而且由于烧掉的燃料留在了行星附近，飞行器还会得到燃料失去的那部分势能。

# 第 10 章

# 高级推进系统

## 10.1 加速行进

在第 9 章，我们讨论了霍曼转移轨道作为从地球到其他行星途径的基本特征。这是一个耗能较少的解决方案，但也有一个非常突出的缺点——要花费太长时间。这是因为，我们必须等到行星排列位置有利的时候才能发射，而且飞行器一旦升空，就成了太阳的一颗行星。它围绕太阳转动，除了较短的转轨过程以外，仅受太阳引力的影响。去往火星的旅程要花 0.7 年，如果要去往其他地外行星，花费的时间更长得多。整个过程都符合开普勒第三定律。

霍曼转移轨道航程用时较长的原因，是宇宙飞船利用发动机加速的过程相对较短。对最小能量消耗的霍曼转移轨道飞行器而言，它大部分时间都在围绕太阳的轨道上自由转动，只有很少几次变速的时候例外。但是，假如我们想要去火星度周末，然后还要及时返回，不耽误收看周一晚上的科幻剧《我的火星知己》，那么我们就需要拥有超长加速时间的飞船，也就是高能耗飞船。很容易就可以看出，传统形式的火箭根本就无法胜任这样的任务。

## 10.2 为什么化学推进系统无法胜任

假设有这么一艘幻想中的宇宙飞船，它可以持续保持一个 $g$ 的加速度，以至于我们在整个航程中，都觉得自己是在正常重力环境下。那么我们就需要考虑三

个方面的问题：

（1）旅程将会花多长时间？

（2）我们在途中能够达到的最大速度是多少？

（3）要输送 10 000kg 载荷，需要花费多少燃料？

我们将主要以最后一条为标准，来评判不同推进系统的优劣。

火星与太阳之间的平均距离是 1.52AU，也就是说，是地球与太阳平均距离的 1.52 倍。因此，在两者距离最近的时候，地球与火星之间的距离就是 0.52 天文单位，或者说（大约）$7.5\times10^{10}$m，也就是 7500 万 km，折合约 4000 万 mile。地面重力加速度约为 $10\text{m/s}^2$，我会假设飞船一直加速到行程的一半，然后在后半程转为减速。毕竟在费了那么多功夫之后，我们并不想因为开得太快错过了火星站。

我们的起点，是美国大学一年级物理课讲到的公式：

$$d=\frac{1}{2}at^2 \tag{10.1}$$

也就是说，在匀加速运动过程中，物体移动的距离（$d$）等于加速度乘以时间平方的一半。我假设在旅程开始时，飞船处于静止状态。对上式移项，可得出：

$$t=\sqrt{\frac{2d}{a}} \tag{10.2}$$

上面的等式有个有趣的特性，由于宇宙飞船在出发的前半程一直都在加速，所以，它只需要两倍的时间，就能跑出四倍的距离。所以说，它跑完火星之旅前半程所需的时间就是（请记住，我们的方案是前半程加速，后半程减速）

$$t_{\frac{1}{2}}=\sqrt{\frac{2\times3.75\times10^{10}\text{m}}{10\text{m/s}^2}}=86\,000\text{s}=1\text{ 天}$$

整个旅程所需的时间就是 $t=2t_{1/2}=2$ 天。如果使用更为简便的计量单位，那么在加速度为 $1g$ 情况下走完 $d$ AU 距离所需的天数就是：

$$t(\text{天})=2.8\sqrt{d}(\text{AU})$$

也就是说，只要能持续实现 $1g$ 的加速度，太阳系就是我们的了。

去往火星的最快速度是半程点上的速度。数值为：

$$v_{\max}=at_{\frac{1}{2}}=10\text{m/s}^2\times86\,000\text{s}=860\,000\text{m/s} \tag{10.3}$$

就算是这个最快速度，也仅仅相当于光速的 0.2%。要以这样的速度运送 10 000kg 载荷，而又选用了化学推进器（喷气速度仅有 3000m/s）的话，我们需要的燃料载荷比约为 $e^{287}\approx10^{124}$ 而这显然是不可能实现的。这种不可能性是物理学

意义上的，而不属于工程学的范畴。因为整个宇宙的质量，都不够你建造这艘飞船。

## 10.3 史上最著名的物理学公式

化学推进器依靠燃料中的化学能来产生推动力。化学能是打破原有化学键，形成全新分子的过程中释放出的能量。换言之，就是某种化合物内部的原子重新组合，改变了彼此之间的相对位置。这就给所有化学反应能够释放出的能量设置了一个上限，因为它们仅仅来自不同原子之间的电势能。

这之所以算是一个约束，其原因在于原子虽然比人的身体小很多倍，但从微观视角看，其彼此之间的距离却相当遥远。我们可以通过估测两个相邻原子间作用力的方法，来估算 1kg 物质中蕴藏的静电势。在通常的液体和固体中，原子之间的距离是 $10^{-9}$m。让我们进一步简化问题，把原子看作是相距 $r$ 的两个电荷，$r$ 的数值等于原子之间的常见距离。这样计算的结果会比精确数值小，但误差并不是很大。

$$E=\frac{ke^2}{r} \tag{10.4}$$

这里的 $k=9\times10^9\,\mathrm{J\cdot m/C^2}$，$e=1.6\times10^{-19}\,\mathrm{C}$，$r=10^{-9}\,\mathrm{m}$。由此可以算出两颗原子之间的电势能约为 $10^{-19}$J。因为每千克固体中约有 $10^{26}$ 个原子，两者相乘的结果是 $2\times10^7$J/kg（也就是 20MJ/kg）的能量以化学能形式存在。作为一个粗略估计，我们能得出这一结果已经很了不起了。例如，汽油燃烧释放出的能量，大约是 80MJ/kg。

但是，质量中蕴含的能量可不是仅有这么一点点。事实上，质量本身就是一种形式的能量，下式即为著名的爱因斯坦质能方程，

$$E=Mc^2 \tag{10.5}$$

这个公式表明：物质中蕴含能量的规模，等于它的质量（$m$）乘以光速的平方（$c^2$）。换言之，1kg 质量相当于 $9\times10^{16}$J，或者说是化学反应中释放出能量的 10 亿倍。如果我们能找到一种方法，释放出这些能量的哪怕很小一部分，那么我们不仅能拿出可用的宇宙飞船设计方案，还将一劳永逸地解决地球所有的能源问题，几乎是直到永远。（后面我们再细谈永远是多远。）可是，该怎么做呢？

## 10.4 高级推进系统设想

### 10.4.1 核能推进系统

至少早在1945年，就有人提出了用核动力推进航天器的设想，理查德·费曼在他的作品《别闹了，费曼先生》中写道：

> 在“二战”期间的洛斯·阿拉莫斯，有一位好脾气的小伙子负责专利事务，他名叫史密斯，是位上尉。史密斯曾给所有人发过一份文件，上面写了大致这样一段话：“我们专利局的同事们非常愿意为你们替美国政府提出的任何创意登记专利，只要与你们当前的工作项目（核计划）有关……您随时可以来我们办公室谈您的任何设想。”
>
> ……当时我就对他说：“你到处分发的那份通知有问题啊。让我们找你随便聊任何想法，这个主意可是太疯狂了……跟核能有关的创意太多，俯拾皆是，我们整天跟你讲都讲不完。”
>
> “还能有些啥？”
>
> “你居然想不出？”我说，“举几个例子：核反应堆……运下了水的话，让水从一边进去，另外一边冒气儿……嘶嘶嘶——这就成了一种新潜艇；或者还是核反应堆，让空气从前边进去，用核系统加热，然后从尾部喷出……呼！一飞冲天，这就成了一种飞行器；或者，先装上核反应堆，然后注入氢气……嗖！上天了，这就叫火箭；再或者，建一座反应堆，不过这次不使用普通铀原料，而使用浓缩铀加上铍氧化物，加热到高温以提高反应效率……然后就是一座发电厂。这样的创意，你能有一百万个。”我撂下这句话，就雄赳赳地出了门。

作为能源的核反应堆，对航天推进器项目有着独特的吸引力，是因为它能提供极大量的能量（每千克燃料能量密度超高），大大超过化学燃料。世界上有两种核反应堆：裂变型与聚变型。在裂变反应堆中，由于中子被捕获，导致整个不稳定的原子核四分五裂；而在聚变反应堆中，较轻的原子聚合成较重的原子，由此释放出能量。

下面我花点时间回顾下原子和原子核的基本结构。其实原子内部主要部分

都是空的。原子整体呈中性，不带电。但其中带负电荷的电子都在外围。使化学反应成为可能的电子层，可以从中心的原子核向外蔓延至 0.1nm，也就是 $10^{-10}$ m 的距离。所有的正电荷都在原子中心区的质子上；对所有呈现中性的原子来讲，每一颗电子都有一个对应的质子。质子被局限在一个直径仅有 $10^{-15}$ m 的狭小空间里。或者说，仅有电子层大小的 10 万分之一。由于电荷同性相斥，就需要某种东西把这些质子“粘”在一起，充当胶水的就是中子。每个质子至少有一个中子与之对应，提供一种力(被称为“强核力”)控制住质子，以免它向外爆炸飞出。中子是中性的(就是说它们不带电)，质量与质子非常接近，比电子大约要重 1800 倍。

原子核内部的电势能，要比原子之间的静电势大得多，由于空间因素影响，可以达到后者的 10 万至 100 万倍。原子核能够释放出的能量，跟整个质量中蕴含总能量的规模相比依然十分有限。但已经比化学反应释放出的能量大得多。

目前，所有商业运营的核电站，都在采用重核裂变为轻核类型的反应堆。随着原子质量上升(也就是原子核中有了更多的质子和中子)，它们会变得越来越不稳定，相对原子质量最大的那些元素，可能会突然四分五裂。这一过程中会释放出能量：在裂变为两个原子核的过程中，原来的大原子核把大约一半的质子从另外一半的旁边移开了。

### 10.4.2 聚变反应

在每一次核反应中，释放出的能量都可以用产物与反应物之间的质量差别来计算。反应堆中常见的一种核反应是这样的[246]1198~1199：

$$n + {}^{235}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{140}\mathrm{Ce} + {}^{94}\mathrm{Zr} + 2n + 208\mathrm{MeV} \tag{10.6}$$

其中，$1\mathrm{MeV} = 1.6 \times 10^{-13}\mathrm{J}$。

由于裂变过程中会产生一个自由中子，只要有足够的铀-235，这个反应过程就是可持续的。与之对应的数量被称为“临界质量”。核电站使用略高于临界质量的反应规模，以便用可控方式产生能源。而核弹，则是突然把两到三个略低于临界质量的铀块扔到一起，所以能引发极快的连锁反应，导致短时间、大规模的能量爆发。两种形式的反应堆，都曾被推荐为推进系统的可行方案。

1kg $^{235}$U 发生裂变反应的能量密度，可以根据这种同位素的摩尔质量(235g/mol)计算得出

$$\varepsilon = 8.5 \times 10^{13}\,\mathrm{J/kg}$$

但是在反应堆中，仅有约3.5%的铀可以浓缩成$^{235}$U，其余多数都以$^{238}$U的形式存在，这种同位素活跃性较差，能量密度仅有$3\times10^{12}$J/kg。但还是比化学反应释放出的能量多大约$10^5$倍。

多数研究核动力推进系统的文章，都是用核反应堆加热氢气，然后从尾部喷出从而实现驱动。选用氢气的原因，是因为它是最轻的原子。在吸收同样能量的情况不，能实现最高的喷射速度。由于下文将会提到的原因，喷射速度还是不会超过8500m/s，或者说比化学反应废气喷射的速度快大约两倍。

核动力宇宙飞船的研究，被20世纪70年代的《禁止核试验条约》明文禁止。此前直到1972年，NASA一直都在研发一系列核能火箭，项目代号为NERVA，是“火箭动力型核发动机”项目的简称。由于从小布什总统第二任期至奥巴马当政期间提出的一系列项目设想，包括载人航天器登陆月球和火星项目，导致人们对这些核发动机的兴趣被再次点燃。由于能够将最初的变速幅度提高至34km/s，核动力火箭有可能会把前往火星的航程缩短至100天以内。

无论是NERVA还是“猎户座”计划，都有些远远超过化学推进剂的地方。其中一点就是它们更适于处理较大载荷（也就是它们能有更大的推力，更高的加速度）。核反应堆的体积有一个下限，但达到下限之后，扩大其规模却并不那么困难。当然，使用核燃料也有显而易见的风险，但往往是被过度夸大了。

### 10.4.3 NERVA计划

罗伯特·海因莱因在作品《“伽利略号”火箭飞船》中描写了一群童子军和他们的核物理学教师一起组装了一艘宇宙飞船，登上了月球，在那里打败了一帮纳粹宇航员，然后胜利返回的故事。在使用核发动机加热并喷射推进气体方面，这是我见过的最早一本书，尽管它比NASA的NERVA计划还早了20多年。然而，在科幻小说中，这类设想并不像其他推进器创意那样受欢迎，原因可能来自早期核反应堆的局限性。

NERVA计划最早于20世纪60年代由NASA提出，目的是制造一艘载人宇宙飞船，于1970年前后登陆火星。科学家们设计了一个小型反应堆，用来给飞船提供动力。反应堆可以把液态氢加热到2200K，然后从尾孔喷出以产生推动力。最早的设计工作显示出了一些令人期待的特性：喷气速度达到$u\approx8600$m/s，是常规燃料型火箭最大喷射速度的近两倍；推力也相对较大，达到73 000N。NERVA计划还曾被看作是航天飞机发动机的备选方案之一。但在国际关系缓和的背景

下，NASA 的经费被大幅削减，加之 20 世纪 70 年代的人们已经对核能产生了强烈的反感，这个项目最终被叫停。

这种推进系统的最大问题是：虽然核反应能够释放出大量能量，但如何使用的问题却并不容易回答。裂变反应堆设计的难处主要在材料科学方面，而不在能源效率上：比如，能量释放的密度，就要受到反应堆制作原料熔点的限制（以及作为燃料的铀合金熔点的最终局限）。此外，核反应释放自由中子，也会损伤飞船发动机，这也会限制反应堆功率。最后，飞船利用核能的方式，仅仅是加热反应气体（氢燃料），这应该不是最充分的能量利用方式。我们应该找到一个更好的办法、一个更聪明的设计方案，争取直接利用全部能量。NERVA 计划仅能比化学推进器略有改进，因为它是一个相对保守的设计方案。但"猎户座"计划设计的推进器，却与任何传统形式的火箭有着根本性的区别。

## 10.5 "炸弹飞船"："猎户座"推进器

这是史上最有趣的核能推进系统，由数学家斯坦尼斯拉夫·乌拉姆和 C. J. 埃弗雷特提出，物理学家弗里曼·戴森和泰德·泰勒于 20 世纪 50 年代设计[41][75]22~24[240]第7章。现在，除了科幻作家们之外，再没有人会严肃对待他们的设计方案了。不过，它的设计思路的确称得上是气吞山河、天马行空。他们基本的设计思路，就是建造一艘宇宙飞船，配上又厚又坚固的装甲作为外壳，然后在飞船尾部引爆核弹，以燃料的冲击波推动它前进。我以上帝的名义发誓，上面的内容绝不是我编出来的。NASA 客气地称之为"核冲击驱动"[210]。戴森先生目前在普林斯顿大学高等研究院任研究员，他认为这个过程能够安全进行，并做了一个先导性研究项目来证明他的论断。整件事的来龙去脉可以参考图书《能量转换的历史曲线：独木舟、星舰与"猎户座"计划》[75,164]。在科学研究方面，戴森是个惯于提出宏大设想的名家。后文我们还会谈到"戴森球"，这是科幻小说中的另一个超级热点。他让"猎户座"飞船行进的方式，是在尾部引爆一系列小核弹，以提供大致稳定的推动力。这里需要注明一点。前面我一直都是在讲核裂变（原子弹的能量来源），而"猎户座"计划使用的，则是特别定制的氢弹。

在科幻小说爱好者圈子里，这个设想非常受欢迎。我自己读过两本使用这一创意的长篇小说，S. M. 斯特林的《石狗》[228]和拉里·尼文与杰里·波奈尔合写的《怒足天降》[187]。《石狗》是一部架空历史小说。在近期或未来，整个世界分裂

成了两大阵营，一方是美国及其盟友，另一方是德拉卡帝国及其属国，首都在南非。德拉卡人蓄养奴隶，却掌握着非常先进的技术。斯特林在作品中假定，由于两大阵营的激烈对抗，导致这个世界的有些军事技术，远远比我们的世界更发达。到 20 世纪 60 年代，运用“核冲击驱动”方式的飞船已经建造成功，后来被用于在月球和小行星带建造殖民地。

作为两位作者合写的一部标志性量产作品，拉里·尼文与杰里·波奈尔在《怒足天降》中展示了又一个遭到外星侵略的地球，这次的外星人长得像是袖珍大象。外星人使用的是巴萨德前置集气型推进系统，下一章我会具体分析。故事中的人类在一群科幻作家及其粉丝的率领下，发起了一个速成计划，要建成一艘配有“猎户座”推进器的宇宙飞船，以此与外星人作战。这类作品的其他范例还有很多。科幻小说作者（及读者）喜欢星际旅行和会爆炸的东西，这两者结合，几乎是无人可挡的绝配。

广岛原子弹释放出的能量约为 $10^{13}$ J，如果这可以转化为动能，就可以让我们惯用的 10 000kg 载荷达到 50km/s 的移动速度。不幸的是，这些能量是在短短几微秒的时间内释放出来的。也就是说，这么大的加速度，会把任何相关人等撞成肉酱。而且，对载人航天项目而言，区区 10 000kg 的载荷也明显不够。事实上，这个项目最早设定的载荷范围就是 10～400t 之间。燃料载荷比大约是 10。它们依靠大约每秒钟引爆一个的小型核弹提供动力，实际废气排放速度约为 20 000m/s，或者说，比我们假设的化学推进器排气速度快大约 7 倍[9]。由此很容易看出，如果这类推进器能够成功制造出来，那么人类就算是去不了外星系，至少也可以乘坐快速火箭，在太阳系内自由来去了。这种火箭只能在太空轨道发射。因为谁也不想让放射性废料落在自家后院儿。要设计一种以核弹驱动的飞船，至少要克服三方面的技术难题：在船后每秒钟引爆一个核弹的情况下，保证宇航员不受辐射威胁；使加速度保持在较低水平，以免把乘员撞成肉酱；设计一个系统，以便每秒钟向船后丢一颗核弹，并及时将其引爆——很高难度的设计问题。据乔治·戴森爆料，在考虑核弹投放机制过程中，“猎户座”推进器设计团队咨询了可口可乐公司的专业意见[75]177～178。最后一个问题就是，不管是美国国会，还是其他任何投资机构，要对这样一个计划注入资金，至少应该说可能性不大。最后一条，就是实际上导致研究活动搁浅的原因。不过，这是个很不错的可供思考的题材。试着用核弹驱动宇宙飞船，会引发一系列相当高难度的设计问题。本书网站就列出了一部分。

“猎户座”计划的最初目的，是用来驱动登月飞船，以及沿着传统的霍曼转移

轨道前往火星的飞船；它的核冲击驱动器只需要开启数分钟时间，用于两个变速过程。总旅行时间是450天。但是，戴森和泰勒却更加野心勃勃。他们想要的具备持续加速能力的飞船，很明显，“猎户座”计划的初衷，应该就是提供这样的飞船。

从整体设计而言，飞船的主体结构设置在一片“推动板”上。它一方面可以作为辐射防护板，另一方面还可以给炸弹提供一个推动飞船的着力处。核弹就是被丢在这块板后面引爆的。推动板与飞船其他部分的连接部有些弹簧和抗震材料，这是为了减少这种特殊驱动方式固有的不稳定性。

理论上的整体表现非常优异。单位推动力高得惊人（$I_{sp}=10^3$ s，或 $u=10^4$ m/s，甚至更高）。这也就是说，要完成通常的1～10km/s的变速操作，燃料与载荷的质量比只需要1∶1就够用。正如人们可以预料的，推动力绝对数值也很可观。

“猎户座”推进器还有一个独特之外，由于制作小型核弹的难度，运用这种技术反而更难制作小型飞船。最早一份设计方案，用于勘探火星，就是一艘重达4000t（$4\times10^6$ kg）的飞船，使用为项目特制的0.1kT核弹。相比之下，用于登月的“阿波罗”系列飞船，质量仅有约14 000kg。在火星任务的往返路途中，需要引爆上千颗核弹。由于因此产生的推动力足够强劲，人们还可以选择霍曼转移轨道以外不那么节能的快速通道。

20世纪60年代早期，由于更多资源被用于“阿波罗”计划的实施，猎户座计划陷入停滞。前者使用了更为传统的化学推进器登陆月球。不过直到今天，“猎户座”计划仍是唯一经过详细研究论证的高速度高推动力推进系统。

## 10.6 星际旅行前景展望

使用核动力推进系统，肯定有它独特的优势。以此能够实现的喷射速度，要比传统化学推进器快两倍、五倍，乃至十倍。它们实际上也是目前能够想象的、唯一可行的大规模星际航行方式。因为它们可以把从地球前往太阳系其他行星的航行时间缩短一个数量级。如果人们可以持续使用“猎户座”推进器，让飞行器始终保持1个 $g$ 的加速度，更加能够把星际航行所需时间缩短上百倍。

但是，即便是离我们最近的恒星，也要比太阳系最遥远的行星更远几千倍。要前往太阳系以外的地方，我们就需要比“猎户座”推进器更强大的能量来源。不过，这个传奇色彩浓厚的题材，还是留到下一章来处理吧。

# 第 11 章

# 空想中的推进系统

在我们当前已知的范围内，还没有任何东西能比光速更快。除了能量限制之外，想到达任何有趣的目的地都要消耗太多时间。除太阳以外，距离我们最近的恒星是半人马座 $\alpha$ 星所在的三星系统，距离是 4.3 光年(ly)。在距离太阳 15 光年的范围之内，共有 32 个恒星系统。100 光年内有大约 600 个。也就是说，即便是以接近光速的速度航行，也需要多年的时间才能到达与我们临近的恒星。我们有一个安慰奖：由于相对论的影响，旅行者不会觉得他们的行程有这么漫长。不过，要达到接近于光的速度，就算是“猎户座”推进器也不够用。

## 11.1 更具空想色彩的推进系统

### 11.1.1 聚变反应堆

聚变反应堆通过将小原子核合成为较重的原子核产生能量。与裂变反应相同，它释放能量的原因，也是产物比反应物更轻。这就是太阳内部的能量来源。那里发生的是氕原子结对的反应。

$$4\,{}^{1}H \longrightarrow {}^{4}He + 2e^{+}\,2\upsilon + 6\gamma(26.71MeV) \tag{11.1}$$

这一反应需要高压环境，而且速度相对缓慢，因而不适合用于地面核聚变。多数研究都集中在重氢(氘)结对的反应：

$$^{2}\mathrm{H}+{}^{2}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{3}\mathrm{He}+n(3.27\mathrm{MeV})\qquad(11.2)$$

或者氘-氚反应：

$$^{2}\mathrm{H}+{}^{3}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{4}\mathrm{He}+n(17.59\mathrm{MeV})\qquad(11.3)$$

理论上，后者的能量密度达到 $3\times10^{14}$ J/kg，或者说，比核裂变反应高一至两个数量级[246]。如果你将聚变反应的废气用于充当宇宙飞船向后喷射的气体，其喷气速度可以达到大约 $2\times10^{7}$ m/s，或 20 000km/s，大致是光速的 7%。理论上，只需要 0.5kg 这样的燃料，就可以把 1000kg 的宇宙飞船送上月球。氘-氘反应的理论喷射速度可以更高，达到光速的 12%。这项技术的一大难点大于：尽管氘原子较为常见，氚原子却非常稀有。它是一种非常不稳定的同位素，半衰期仅有 12 年。尽管有这样的难题未能解决，但在 1974 年，旨在研究跨星系航行飞船的"代达罗斯"计划中，还是采用了氘-氚反应聚变推进器，并认为这是所有驱动方案中唯一可行的选择。

聚变反应只能在数百万度高温且高压环境下才能发生。因而难以在可控条件下实现。不过，如果人们掌握了这门技术，那就几乎相当于找到了取之不尽的能源。这就是在过去 50 年间，开发可控的聚变反应堆成了物理学研究圣杯的原因。聚变反应电站的商业化运营，基本上可以解决全球能源问题。但是，它与传说中的圣杯，的确又有着诸多相似之处：没有人知道这件事该怎样去做，尽管已经做了大量的研究。就像一个笑话说的：聚变反应堆建成的时间，永远都在二十年后。毋庸赘言，同样没有人知道该如何建造聚变反应堆驱动的火箭，尽管也有人提出过这样那样的猜想。

也就是说，聚变火箭肯定是个好东西，前提是我们能学会建造它。我了解到的史上第一项使用聚变发动机的星际探索计划，就是 1975 年的"代达罗斯"计划。这是一项态度严谨的正式研究，由多位科学家和工程师参与，旨在完成一份"理论蓝图"，设计一次目的地是伯纳德星的飞越勘察任务，后者距离地球 6 光年。人们选定的速度是 15%光速，因此行程时间将达 40 年。这项计划绝对有一些科幻色彩。比如说，项目中就包含了开采木星来获得氚作为燃料补给。这项计划看似正处在可能的边界线上，人们可以自行猜测它在红线的哪一边。

不过，类似于这一类星际探索计划的前提，都是假设我们人类社会有极为丰富的能源。"代达罗斯"计划的成本估计为 10 万亿美元。考虑到任何物品的价格 20 年翻一番的生活常识，这一计划现在的成本应该有 40 万亿美元，比美国现在一年的国内生产总值（GDP）还要高，与整个世界一年的国内生产总值（GDP）数量相当。能量消耗规模可以帮我们理解这份账单：计划中的能量消耗，约占全球一年

能源消耗量的10%。这么高昂的代价，超过了全球任何一个地区的承受水平。甚至有可能在任何条件下，都不是人类文明体系所能够承受的。

### 11.1.2　巴萨德前置集气系统

除了太阳之外，距离地球最近的恒星是半人马 $\alpha$ 星，距离大约是4.3光年。在10%光速条件下，宇宙飞船也要43年才能到达那里，然后还需要同样长的时间返回——假如我们还打算回来的话。聚变反应堆驱动的飞船可以达到这么高的速度。假设废气喷射的速度是 $2\times10^7$ m/s，算出的燃料载荷比还不算可怕。如果我们没打算减速，每千克载荷需要3.5kg燃料，如果打算减速就要增加四倍，或者是燃料载荷比为12左右。如果我们还打算回来，就要取最初数值的四次方（约144）。不过，这么漫长的旅途肯定是超过了正常人类的寿命，即便是相对论效应导致的“时间延缓”也帮助不大。不幸的是，想再近一步提高速度，就非常困难了。

当速度逐渐接近光速，此前我们提出的火箭方程就将失效。我们需要得出一个新的计算方法，并将狭义相对论的影响考虑在内。新的方程最早由埃克雷特在1946年发表的一篇论文中提出。你可以在下面这篇文章中找到公式变体的英文版：贝德所写的《相对火箭学理论》，刊载于《美国物理学杂志》[17,29]：

$$\frac{v}{c}=\frac{(m_i/m_f)^{2u/c}-1}{(m_i/m_f)^{2u/c}+1} \tag{11.4}$$

上式中各个变量的含义分别是：

- $u$：喷气速度（假定为 $2\times10^7$ m/s）；
- $v$：宇宙飞船最终达到的速度；
- $m_i$：宇宙飞船的最初质量（有效载荷加燃料）；
- $m_f$：宇宙飞船的最终质量；
- $c$：光速（$3\times10^8$ m/s）。

我将定义三个新的变量，以便减轻我们的计算负担：

- $R$：初始与最终质量比 $m_i/m_f$；
- $\alpha$：喷气速度与光速的比值 $u/c$；
- $\beta$：最终达到的速度与光速的比值 $v/c$。

然后我们就可以解出达到一定比率光速所需的质量比：

$$R=\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)^{1/2\alpha} \tag{11.5}$$

问题在于，没有什么东西能快过光速。非相对论的火箭方程没有考虑到这一点。基本上，随着速度加快，质量比增大的幅度也越来越快，以至于要达到光速时，质量比就会达到无穷大。在喷气速度假定为上述数值不变的情况下，哪怕仅仅是要达到90%的光速，也需要高达39亿倍的质量比。

这么大的质量倍数显然是不行的，那我们还能怎么办呢？1960年，物理学家罗伯特·巴萨德提出了一个富有创见的设想：宇宙空间并非绝对空无一物。星际空间中也散落着一些极为稀薄的物质，其主要成分为氢。平均起来，星际空间中每立方厘米会有一颗原子（或 $10^6/m^3$），尽管在密集的分子云中，相应的浓度可以达到 $10^9/m^3$，甚至更高[130]435~438。于是，在星际航行的路上，飞船可以收集这些物质，并将其用做燃料[44]。

巴萨德设想出一种铲斗状或长管状结构，可以安装在航天器前方，延伸出数百乃至数千千米的长度。收集并压缩宇宙空间中的氢，使之达到发生聚变反应的条件，以便为飞船提供动力。这个设想在科幻圈子里非常受欢迎。除了反物质发动机之外，它似乎是近光速星际航行唯一可行的选择。这个设想被无数科幻作者采用，其中包括波尔·安德森这样的大家（这部作品名为《宇宙过河卒》）。但最为知名的还要数拉里·尼文的《已知空间》系列短篇作品。也正是这个系列，让这一概念流行了起来。事实上，要列举尼文作品中没有使用这一设定的例子，可能反而容易些。举几个例子：

- 在长篇小说《保护人》中，派克星人福斯鲍克乘坐一艘前置集气式飞船，从银河系中心来到了地球（途中花费了三万年时间）。在全书的后半部分，布列农星怪兽和派克星侦察兵使用前置集气式飞船，打了一场地域范围广大的星际接触战。
- 在《地球的礼物》及其他长短篇小说中都曾提到，使用了巴萨德前置集气式装置的无人飞船在星际空间巡游，寻找适合居住的行星（在小说中被称为"宜居星点"）。其后会有"慢船"运送人类移民前往。
- 在短篇作品《疯狂者的伦理》中，一个疯子偷走了一艘宇宙飞船，并用它杀死了友人全家，然后就被登上前置集气式飞船另一群人追杀，真的追到了宇宙的尽头。
- 在不属于《已知空间》短篇系列的长篇作品《时间之外的世界》中，被称为"国家"的全球联合政府，使用死而复生的"僵尸船员"驾驶前置集气式飞船，去寻找有细菌生活的类地行星，意图对其进行地球化改造，以便进行移民。^

而上面所有这些，还只是众多作品中的一部分。

下面，我将对巴萨德前置集气式飞船进行一番不涉及相对论的分析，如果想了解充分考虑相对论的版本，可以参考巴萨德本人最初发表的论文，或者后文提到的任何参考书目。

乍看上去，由于前置集气式飞船沿途收集所需燃料，我们貌似可以永远加速下去，而无须受到火箭方程的任何约束。下面，让我们先给出一些假设前提：

(1) 这艘前置集气式飞船总质量为 $M$，如今正在航程路途，相对于地球的速度为 $v$。

(2) 它配有某种管状结构，可以收集星际物质送入聚变发动机。管状结构的面积为 $A$。

(3) 聚变发动机使用飞船收集到的一部分氢气 $f$ 用作燃料，供能效率为 $\alpha$，并以速度 $u$ 将剩余部分的氢气从尾部喷出($u$ 的数值与 $f$ 和 $\alpha$ 的值有关)。

(4) 星际空间中的氢密度为 $\rho$。

宇宙飞船的推动力大小取决于两个因素：一是喷气速度 $u$，二是发动机单位时间内获得的燃料质量 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$，其数值可证明等于 $\rho Av$。这个等式是合乎逻辑的：飞船跑得越快，收集到的氢气就越多；收集管面积越大，越容易收集更多气体；而周围氢气密度越高，收集到的氢气自然也就越多。

$$T = u\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} = \rho A(1-f)uv$$

在其他条件不变的前提下，飞船速度越快，能够产生的推动力越大。如果我们想保持恒定的加速度(也就是保持恒定的推动力)，就需要控制 $f$ 值，也就是参加聚变反应的氢气的比例。如果我们通过集气系统收集到的氢气质量是 $m$，(在不考虑相对论影响的前提下，)燃料喷气速度将是

$$\frac{1}{2}(1-f)mu^2 = f\alpha mc^2 \tag{11.6}$$

或者：

$$u = c\sqrt{\frac{2f\alpha}{1-f}}$$

利用上述两式得知，加速度数值($=T/M$)可以用下列公式计算得出

$$a = \frac{A\rho}{M}\sqrt{2\alpha f(1-f)}vc \tag{11.7}$$

如果我们想要让加速度保持恒定(比如整个航程中始终为 $1g$)，那么我们就必

须让 $f$ 值(表示多大比例的氢气用于聚变反应)由 $v$ 值决定。要得出 $f$ 的值,就要解出下面的二次方程:

$$f(1-f)=\frac{1}{2\alpha}\left(\frac{aM}{\rho Avc}\right)^2 \tag{11.8}$$

如果我们想让加速度达到指定数值,也会有一个最低限速,那以下将无法再进行调节。原因也很简单,速度过慢时,集气装置得不到足够的氢气来提供所需推动力。

飞船还受到另外一种力的作用。就像在地球表面运动,穿过流体的物体一样,飞船会受到"阻力"。阻力数值的一般公式是

$$D=\beta\rho Av^2 \tag{11.9}$$

其中的 $\beta$ 是无量纲的个位常数,其具体数值取决于集气装置的形状。也就是说,飞船速度将存在一个最大值:随着飞船速度加快,它受到的阻力也将逐渐增大,直到与推动力数值相等,此时,

$$\beta v^2=\sqrt{2\alpha f(1-f)}\,vc \tag{11.10}$$

当 $f=1/2$ 时,$f(1-f)$ 有最大值,于是飞船的最快速度就是

$$v_{\max}=\frac{\sqrt{\alpha/2}}{\beta}\times c \tag{11.11}$$

最佳情形下,当 $\alpha=7\times10^{-3}$ 时使用氘-氘聚变反应,最快速度约为光速的 6%。当然,具体数值还跟 $\beta$ 有关,所以可能还有某种对集气装置进行"流线改造"的方法,以减轻阻力的负面影响。

除了上面已经提到的速度上限之外,这种推进系统设想还面临其他一些难题,很可能会导致它根本就无法实现。具体有:

- 在巴萨德最早发表相关论文的 20 世纪 60 年代,人们还不知道,我们太阳系正巧处在星际空间中一个高温"热泡"的中央。这个结构的直径大约有 650 光年,其中的气体浓度相对较低,每立方厘米仅有 0.006 颗分子,或者说每立方米仅有 6000 个分子[130]135。这个密度,大约比巴萨德的估计低了两个数量级[44]。
- 星际空间中物质的主要成分的确是氢,但正如我们前文已经说过的,氢发生聚变反应的速度慢,控制难度大。
- 重氢(氘)发生聚变反应较为容易,但是宇宙空间中的重氢,要比普通氢少数千倍。

- 只有当集气装置面积与飞船质量的比值很大时，集气式飞船才可能正常飞行。因而大多数论文都集中讨论了使用磁场来收集气体的可行性。这种方案仅适用于带电粒子。还有人提出使用激光促使星际物质电离，或使用更强的磁场。即便是我们无视阻力影响，我们在制造强磁场方面的重大局限性，还是会让飞船到达相对论性速度后的加速能力大大受限[158]。在低速状态下，集气斗的直径甚至需要达到 $10^7$ km，才能让飞船正常运行[159]。
- 质量转化为能量过程中通过辐射失去的能量，会使飞船的速度总是大大低于光速[215]。
- 当带电粒子加速时，就会丧失能量。这种所谓“轫致辐射”带来的能量损失，甚至可能要比星际物质聚变产生的能量大 $10^9$ 倍[123]。[B]
- 最后，在我印象中，还没有人提出过这一点：带电粒子从正面高速冲击集气磁场，会令它的形状发生扭曲（如图 11.1 所示），就像太阳风导致地球和木星磁场变形一样[130]275。这会使磁场向飞船方向偏转，导致它收集气体的能力下降。

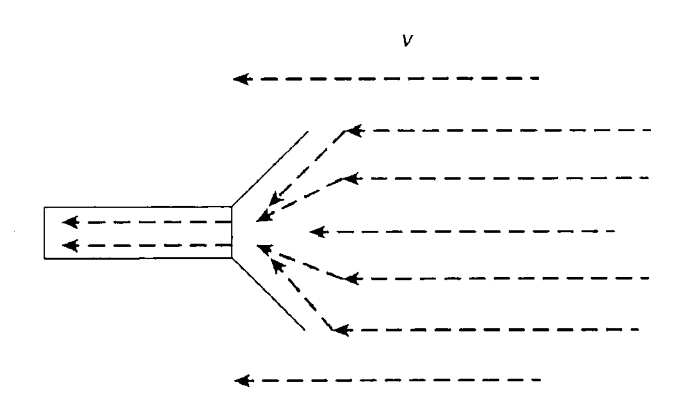



图 11.1　空间气体颗粒进入集气系统

这一设想的其他潜在问题，在约翰·莫尔丁的书《星际旅行的前景》中有详细的讨论[160]110~116,326。即便集气式飞船最终能够开发成功，它的这些潜在问题也可能会导致其速度大大受限，很可能不会超过光速的 10%。

多数科幻小说作者都会无视这些潜在问题，假设集气式飞船能够无限加速下去。不过有了关于速度极限的知识，我们至少不会再受到《宇宙过河卒》和《时间之外的世界》里面那些不严谨情节的蛊惑。尽管这类飞船的速度已经相当快，如果我们想在有生之年到达其他星系，我们还需要进一步提高速度，而且是大大提

高。可是，到底要怎样才能做到呢？

### 11.1.3 反物质驱动器

这次我们将再次求助于流行文化。尽人皆知，编号 NCC—1701（或 1701A、1701D）的“企业”号星舰，是由物质与反物质相互反应产生的能量驱动的。从电视节目中并不容易看出，飞船究竟是完全依靠这类反应来驱动，还是仅有在启动脉冲发动机时才用到此类反应。（我一边写这几行字，一边就预料到自己肯定会收到不少死忠粉丝的邮件，并在其中引经据典告诉我说，其实原著交代得非常清楚。）或许将来，我们真的可以像“星际联盟”一样，使用反物质发动机来推动宇宙飞船。

那么，反物质又是何方神圣？这故事可就长了。话说早在 20 世纪 30 年代，物理学面临的一大考验，就是如何把两种新生理论体系（狭义相对论和量子力学）统一起来。当时有一位英国物理学家名叫保罗·迪拉克，他提出了一个方程用于描述电子的量子相对运动。解答这道方程之后得出的推论是：世上应该有一种与电子对应的粒子，它与电子的质量相等，其他各方面属性也完全相同——除了电性相反。因为普通电子带的是负电，所以新的电子就被称为正电子。加州理工学院物理学家卡尔·大卫·安德森在 1932 年进行的云室实验中第一个发现了正电子。物理学家很快得知，所有基本粒子都有与之对应的反粒子。在随后数十年间，反中子、反质子等物质先后被发现。

非物理学家往往会有一种误解，认为反物质仅仅是一种幻想，或者尚未得到证明的理论假设，其实这是不对的。在全世界范围内进行的加速器实验中，已经制造出了数以万亿计的反物质粒子。这并不意味着制造反物质非常容易。2001 年，欧洲核子研究中心（CERN）——欧洲最大加速器的运营集团曾发布报告说：目前全球每年的反物质产量不足十亿分之一克，而对应的制作成本，则高达每克数万亿美元[2]。

成本为什么这么高呢？这是因为反物质在自然状态下并不存在，或者至少是数量微小到难以察觉的地步。绝大多数物质都是“正常的”，自然状态下产生反物质，只能是在放射性衰变过程中或者是超过太阳中心温度的极高温环境下。问题的关键在于质能方程 $E=Mc^2$。要产生质量为 1kg 的反物质，就要提供与之对应规模的能量，或者说 $9\times10^{16}$J。换言之，整个美国一年消费的能量总值（$1.4\times10^{20}$J），也仅仅相当于 750kg 物质与反物质互相湮灭产生的能量。如果反物质大量存在，就可以为人类文明提供能源。而当它不存在时，反而就要消耗极大量的能源才能

生产出它们。

这并不意味着一定要付出当前这样昂贵的代价才得到反物质。如果产生反物质的主要成本仅仅是能源的话,其费用将不足目前水平的百万分之一。比如汽油中含有的能量,每加仑就有 $10^8$J 之多,这意味着我们需要燃烧 9 亿 gal 汽油,才能得到与 1kg 反物质相当的能量。按照 2009 年美国市场汽油售价每加仑 2.5 美元的价格计算,能源成本为 22.5 亿美元。此前曾有过几次严肃的提议方案,主张大规模生产反物质;主要来自已故的罗伯特 · L. 福尔沃德,他认为能够明显降低生产成本,让反物质能够作为宇宙飞船的燃料使用[87]。

下面我们来继续讲述反物质用于推进系统的具体作法。这里要澄清的一个误解是:物质与反物质互相"湮灭",产生的并不是所谓"纯能量"。这样的论断本身并无意义。事实真相是:基本粒子与其反粒子之间的相互作用,会导致新物质产生,与通常的化学反应类似。我们的推进系统能够得到多少可用的能量,与参加反应的物质类型有关。最简单的状况,就是考察彼此相对静止的电子与反电子之间的反应。其化学式为

$$e^- + e^+ \longrightarrow 2\gamma(1.02\text{MeV})$$

上式是一个简单的记法,描述了电子与反电子反应,产生伽马射线(也就是两个超高能光子)。如果电子与反电子相对静止,伽马射线的能量总值就等于电子与反电子之间的静态能量,约为 1MeV,或 $1.6\times10^{-13}$J。MeV 是一个缩写,代表百万电子伏特,其中的"电子伏特"是另一个计量单位,数值等于 $1.6\times10^{-19}$J。为简化计算起见,多数粒子的质量都以 MeV 或 GeV(=1000MeV)为单位。物理学家习惯于在必要的时候迅速将这些单位换算成公制标准单位。因为电子已经是有质量的基本粒子中最轻的类型之一(仅重于中微子),所以电子与反电子在相对静止条件下互相湮灭,只会产生光子。这是好事,因为从理论上讲,电子的全部静态质量都可以转化为能量来推进宇宙飞船。

推进飞船的一种方法,是利用反应产生光子的势能来推动它。照耀在你手掌上的阳光也是有能量的,只不过在通常情况下,其能量值都较小。如果我们用一束光来照一面镜子,镜子就会受到一股将它推开的力。其数值等于:

$$F = 2P/c \tag{11.12}$$

其中的 $P$ 是光线的功率(也就是单位时间内镜子得到的能量),而 $c$ 是光速。在多数情况下,这种力量都比较小。比如,如果我们用 1W 的手电筒照在镜子上,镜子受到的净作用力将仅有 $3\times10^{-9}$N。不过,假如我们搞到 1kg 某种物质与 1kg 与之对应的反物质,把以此产生的伽马射线照射在镜子上并持续 1s,净力将达到

$6\times10^8$ N。就算这面镜子的质量有 10 000kg(10t)，它最终也会获得 60 000m/s 的速度。

## 11.2 物质-反物质推进系统的质量比

这项技术的倡导者们，如福尔沃德和喷气推进实验室的罗伯特·弗雷斯比，曾编撰过大量文献，研究基于物质-反物质技术的推进系统。文献中涉及很多边边角角的细节，我们这里不会展开太多。尤其值得一提的是，弗雷斯比似乎认为，中子-反中子推进系统要比电子-反电子系统更好用，尽管反应物中可用于推进飞船的“有效质量”比例不如后者[88]。为简单起见，我这里将仅仅考虑反应物变成高能伽马射线，并投射在某种镜面上推进飞船的情况。

将 $u=c$ 代入方程(11.5)，可得到：

$$v=\left(\frac{R^2-1}{R^2+1}\right)c \tag{11.13}$$

其中 $c$ 是光速，$R$ 是质量比($m_i/m_f$)，而 $v$ 是宇宙飞船最终达到的速度(假设其从静止状态启动)。对 $v\ll c, v/c\approx R-1$。由于 $c=3\times10^5$ km/s，要让 1000kg 载荷达到 11km/s 的地球逃逸速度，就需要 18g 物质与其反物质进行反应。

表 11.1 显示了使用反物质发动机推动宇宙飞船的真正优势。燃料载荷质量比只要达到 10，就能实现光速的 98%。不幸的是，这时候每运送 1kg 货品，就需要 5kg 普通物质加上 5kg 反物质，但是 5kg 反物质已经比现实世界中的反物质含量高了上万亿倍。

**表 11.1 不同燃料—质量比率下反物质火箭能够达到的最快速度**

| 质量比($R$) | 速度/光速($v/c$) | 速度(m/s) | 质量比($R$) | 速度/光速($v/c$) | 速度(m/s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.01 | 0.01 | $3.00\times10^6$ | 2 | 0.6 | $1.80\times10^8$ |
| 1.05 | 0.05 | $1.50\times10^7$ | 5 | 0.92 | $2.76\times10^8$ |
| 1.1 | 0.1 | $3.00\times10^7$ | 10 | 0.98 | $2.94\times10^8$ |
| 1.2 | 0.18 | $5.40\times10^7$ | 20 | 0.995 | 大约 $3\times10^8$ |
| 1.3 | 0.26 | $7.80\times10^7$ | 100 | 0.9998 | 大约 $3\times10^8$ |
| 1.5 | 0.38 | $1.14\times10^8$ | | | |

世上没有方便可用的反物质资源，在我们已知范围内，整个宇宙绝大部分都是普通物质构成的。也就是说，你想使用反物质就要自己来制造。这是可能做到的，世界各地的加速器都在完成此类任务，但数量规模都极小。常见的反物质产生速度是每秒钟 $10^{10} \sim 10^{12}$ 颗，或者说（假设我们制造的是反质子）$10^{-17} \sim 10^{-15}$ kg/s。通常而言，用当前的加速器生产 1kg 反物质，需要 $10^{15}$ s，折合大约 3000 万年。

但目前，我们制造反粒子的目的，还不是用来推动宇宙飞船。不深入展开相关细节的话，可以大致总结为：目前工作的难点还是能源。如果我们有足够的能源，我们就能制造出反物质。问题是我们能制造出多少？以及会花费多大的代价？

## 生产反物质的时间和成本需求

根据换算关系 $E=Mc^2$，在能量为 $E$ 的情况下，我们能制造出的质量不可能大于 $E/c^2$。那么，让我们以下列几条为起点来考虑眼下的问题：

(1) 我们有一座电站，可以在 $P$J/s 的功率上为我们提供能源；

(2) 每千瓦时($3.6\times10^6$J)能源成本为 $s$ 美分；

(3) 我们将能量转化为质量的效率为 $f$，它小于 1；

(4) 我们打算制造 1kg 反物质(相当于 $9\times10^{16}$J)。

现在我们需要搞清楚两点：以 $P$ 和 $f$ 为自变量，将有怎样的公式，可以用来计算转化过程所需的时间？总成本为多少？

当时间为 $T$ 时，电厂产生的能量总值是 $Pt$ 焦耳，或者说能产生 $Pft/c^2$ 千克反物质。所以，产生 1kg 反物质所需的时间就是：

$$t = 9\times10^{16}/Pf(s) = 2.85\times10^9/Pf(\text{yr})$$

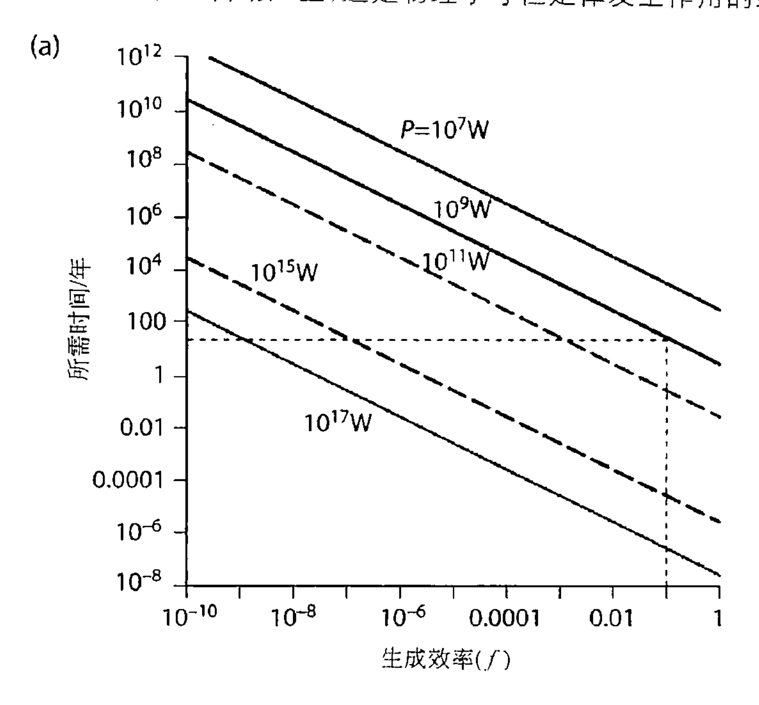
上文中利用了一年等于 $3.16\times10^7$ s 换算关系。图 11.2(a)展示了电站功率在 $10^7 \sim 10^{17}$ W 的情况下，电站需要的运行时间。对其中两个数值做一下说明：$10^{13}$ W 大约是目前全球发电总功率；而 $10^{17}$ W 约相当于地球得到的太阳光照总功率。

据此，我们也可以用包含变量 $s$ 的式子，计算出能源方面的总成本(单位为美元)：

$$M=2.5\times10^8 s/f(\$) \tag{11.14}$$

其中的 $M$ 代表“金额”。图 11.2(b)展示了 $s$ 取每千瓦时 $10^{-3}$ 美分、每千瓦时 $10^{-1}$ 美分，以及每千瓦 10 美分时(这大致是美国当前的发电成本)的成本曲线。应该指出的是，这两个数字都是呈指数变化的，其取值受到能源利用效率、价位、可用总功率等一系列因素的影响。其中的 $f$ 必定≤0.5，因为每产生一个反物质

粒子，就会有一个普通粒子自动产生，这是物理学守恒定律发生作用的结果。



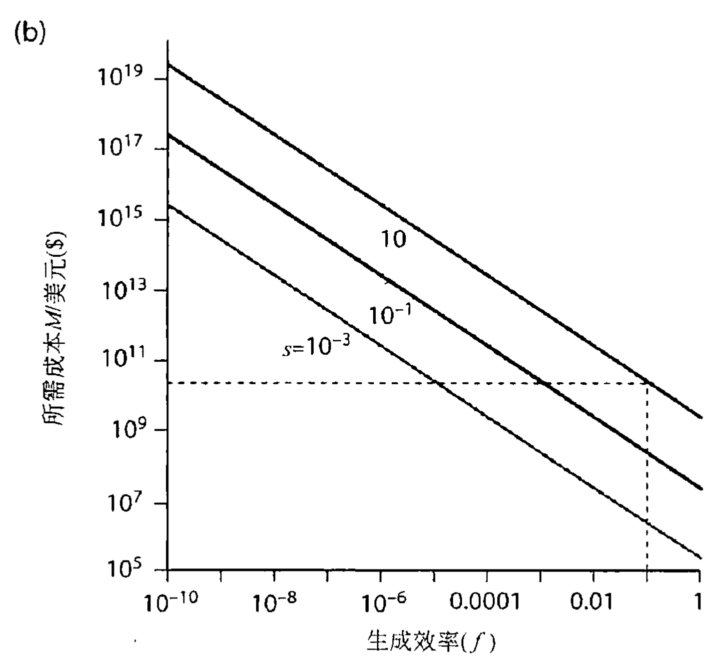




图 11.2　生产 1kg 反物质的能量和时间成本

在当前技术条件下，$f$ 实际可以达到的数值又是多少呢？罗伯特·L.福尔沃德曾详细研究过这一课题。1984 年，美国空军科研部门曾报告说：据估计，使用特别研制的线性加速器之后，整个系统的能源利用效率可以达到 $f=2.5\times10^{-4}$[87]3。C据我所知，这种专用线性加速器从来没有制造出来过。不过，《物理学研究通讯》杂志最近发表过一篇论文，展示了采用高能激光脉冲方式制造反电子的方法，整体效率为每千焦 $10^{11}$ 个电子，对应的效率为 $f=8\times10^{-6}$[104]。这还只是初期实验数据，就是说如果进一步发展完善，应该可以将其效率提升一两个数量级，可能达到 $f=10^{-4}$ 级别。我认为，在转化效率方面应该没有什么物理学规律限制其上限，只是还需要完善很多工程学细节，但我的想法也可能完全错误。而且我们还忽视了另一个极为复杂的问题：我们能把这么多反物质储存在哪儿？

上面的数字已经足够说明：在任何情况下，制造反物质都是一件费时费力、代价高昂的事。我在前面两张图表中，都用虚线标出了一种情况：假设我们把功率为 1GW 的发电站全部投入这一项目（在目前来讲，这已经接近于无法实现），而且设法将系统效率提升到 10%（也就是 $f=0.1$，这可能是永远无法达到的理想水平），那么整个工程还是要花掉 30 年，投入 250 亿美元。如果假设系统效率是更为贴近实际的 $10^{-4}$ 级别，那么在上述同样时间，花费同样数量资金的情况下，就仅能制造出 1g 的反物质。后者正是福尔沃德在他的报告中努力实现的目标。福尔沃德对成本的估计值与我接近：他认为，在 $f=10^{-4}$ 情况下，反物质的制造成本约为每毫克 $10^7$ 美元[87]150。

我读过的科幻小说中，唯一老老实实面对这一问题的，仅有拉里·尼文和布伦达·库珀合写的作品《建造丑星之月》[185]。在这部作品中，“约翰·格伦”号星舰正在逃离被纳米技术毁掉的地球。这艘飞船使用反物质发动机，可是后来发生了故障，中途停在一个陌生星系，要制造足够多的反物质才能继续航行。生产这些反物质真的需要花费数百年的时间。生产反物质要受到能量因素的制约，你能生产多少反物质，取决于你手头有多少能源可供使用。在多数情况下，这一过程都会非常缓慢。

## 11.3　辐射问题

获得过诺贝尔奖的物理学家爱德华·普赛尔曾于 1963 年指出。即便不考虑成本问题，想快速到达宇宙间的其他地方，也会面临另外的各种考验[46]121~143。这

些风险与辐射有关，它不止会威胁到宇航员，如果我们不够小心，甚至整个地球都可能面临危险。

我们假设已经收集到了足够的反物质，想要派出一支探险队探索宇宙空间。假设我们让他们以 99.5％的光速往返，并始终保持 $1g$ 的加速度。根据表 11.1，这意味着飞船燃料载荷比为 20。但这只够出发时加速，到达时要减速至停止，质量比 20 倍；返程加速又是 20 倍，减速又是 20 倍，整个的质量比成了：

$$R = 20^4 = 160\,000$$

用日常语言描述就是：飞船上每 1kg 的质量，都要携带 160 000kg 的燃料，其中包括 80 000kg 普通物质和 80 000kg 反物质。对我们惯用的 10 000kg 载荷宇宙飞船而言（如果是载人航行，这个大小可能还不够），我们就需要惊人的 $1.6\times10^{19}$kg 燃料，其中蕴含的能量高达 $1.44\times10^{26}$J，相当于我们目前的人类文明在未来 50 万年可能消耗的能量总规模。

即便如此，飞船“升空”时需要达到的功率还是可以计算得出。理论依据是：这种“光子火箭”的推动力与火箭向外施加的力量紧密相关。如果力记作 $F$，功率记作 $P$，则有：

$$F = 2P/c$$

由于飞船保持 $1g$ 的加速度，而 $g$ 约为 $10\text{m/s}^2$。为此需要提供的净力是 $1.6\times10^{10}$N，需要达到的功率是 $2.4\times10^{18}$W。这样的能源利用率比我们现在已有的大 10 万倍还多。地球从太阳处所获得的总功率，还要比它低一个数量级。如果我们在靠近地球轨道的任何地方发射这样一枚火箭，可能就将永久性地破坏地球生态环境。尤其危险的一点，是所有这些能量都是以高能伽马射线的形式发出的，与太阳光完全不同[46]138。一艘这种类型的宇宙飞船显然不能从地球近处发射。普赛尔还指出，在这样的相对速度之下，飞船沿途碰撞到的氢原子都会获得与高能宇宙射线同样的能量，所以要配备高度复杂的防护系统，才能保证船员安全，免受辐射危害。

普赛尔在文章的最后总结说：

> 好吧，你很可能会说：这不合常理。不过我的用意恰在于此。就是要指出此类猜想的荒谬之处。请记住，我们目前推导得出的结论，都是基本的物理学法则强加给我们的必然结论。那些口口声声大谈宇宙“生存空间”的家伙们，只是还没有做过这些计算。而在他们完成这类计算之前说的那些话，通通不过是废话而已。

我个人并不确定那些想象是不是纯属狂想，但显然超过了目前所有人类的能力范围，或者也超过了任何其他文明力所能及的限度。也或许不是。在第 21 章“古戈年”中，我会谈及高级文明形式问题。在此之前，我们已经多次提到相对论，却始终没有触及最好玩的那个问题：时间延缓。尽管宇宙辽阔无边，但如果掌握了大量的能源，再借助相对论的帮助，一个人也可以在有生之年遨游太空。

**注：**

A. “僵尸船员”是将垂死的人类转入低温冷冻状态，并在数百年后被掌权者在其他身体内复活的人类。科幻小说中常常出现这样的角色。其中最广为人知的可能是电视剧《未来奇遇记》中的情节。

B. 这篇论文的作者提出，由于“韧致辐射”带来的能量损失，集气装置可能反而是近光速飞行的飞船减速的有效方法。

C. 读这类报告时，请务必留意区分两种不同的效率，相对较低的“整体能量利用效率”和高能中子轰击目标产生反中子这个单一过程的效率，后者数值较高。

# 第 12 章

# 星际旅行与相对论

## 12.1 时间足够你做任何事

> 他上上下下打量了我一番，然后很震惊地感叹道："理智上我能明白，这么多年过去了，你会没有一点变化。可是现在自己亲眼看到，意识到之后，我还是觉得很别扭。你说呢？"①
>
> ——罗伯特·海因莱因 《群星时代》

罗伯特·海因莱因的长篇小说《群星时代》，本质上是讲给物理学圈里人的一则冷笑话。小说中的主人翁是巴特莱特两兄弟，汤姆和皮特。两人是同卵双胞胎，具有远程心灵感应的特殊能力。小说中，心灵感应的速度比光速更快。具有通感能力的人通常是同卵双胞胎，他们被用来保持宇宙飞船"刘易斯和克拉克"号与地球之间的通信联系。汤姆上了宇宙飞船，而皮特留在地球上。那艘飞船造访了几个不同的星系，探索和发现与地球类似的行星。汤姆返回时，地球上已经过了近 70 年的时间，但汤姆自己只老了 5 岁而已[113]。

我把这部作品称为物理学笑话，因为海因莱因在故事里讲述的，实际上就是相对论中的"双生子佯谬"：如果有一对同卵双胞胎，将其中一人送上接近于光速

① 这后面还有一句"The Picture of Dorian Gray."，意为《道林·格雷的画像》，是奥斯卡·王尔德唯一的一篇长篇小说名。

的宇宙飞船，让他到极远处航行；另外一个留在原处。等到旅行者回来之后，他（或她）会比留在家里的兄弟或姐妹年轻，尽管在出发时两人的年龄完全一致。这是因为爱因斯坦的狭义相对论表明：时间在不同的参考系中消逝的速度不同。

这是科幻小说中另外一个极为常见的主题：当人们“接近光速时”，时间的步调将会放缓。不过，这本来是个非常复杂的主题，而且很容易搞错。事实上，就连海因莱因这样的科幻大师，作品中写到此类问题的时候，也犯过几次错误，我们后面再详谈。首先，我想从众多写到这一主题的科幻作品中举出几个例子：

- 《千年战争》，作者乔·霍尔德曼。故事中展示了人类与外星人之间发生的一场旷日持久的战争。敌方拥有接近光速的宇宙飞船，常常借助“宇宙塌陷”（黑洞）进行穿越航行，以便超越光速。（抱歉，这个真的是做不到的。）主角的女朋友想要在他眼里永葆青春，所以就不停地在地球与远星殖民地之间，以近光速飞来飞去[107]。
- 波尔·安德森的小说《宇宙过河卒》。作品临近结尾的时候提到：有一艘受到诅咒的巴萨德集气式飞船，不断加速到接近光速后，船员们几乎是走遍了整个宇宙。
- 《地狱犬的第五颗头颅》，作者吉恩·沃尔夫①。小说中有一位人类学家，从地球前往圣克鲁斯与圣安娜双行星系统。这并不是作品的骨干情节，不过这位人类学家说过一段很有意思的话。他说自从他离开地球，那边已经过去了80年的时间。很大程度上，他就是因此而不愿意返回地球的。
- 拉里·尼文的作品《时间以外的世界》。前置集气式飞船杰洛米·考贝尔号去了银河系中心然后返回，船员老了90岁，而地球上已经过去了300万年[182]。

此外还有很多很多这类的例子，而且有很充分的理由。科幻作者认为相对论是个好东西。因为它缩短了群星与地球的距离，至少对快速飞船上的宇航员来说如此；对他（她）留在家里的兄弟或姐妹，事情可就没有那么简单了。重要的事实是：太阳系的其他行星，离地球的距离从数千万千米到数百亿千米不等。这当然已经是很远的距离了，但在使用化学推进器的情况下，还能够用几年至几十年的时间到达。我们还可以想象在人类寿命范围内送他们登上这些行星。如果我们假设能发现更新的推进系统，沿途所需的时间还有望大大缩短。

---

① 吉恩·沃尔夫（Gene Wolfe，1931— ），美国的科幻奇幻小说作家。他以受到天主教信仰所影响，充满暗喻的散文而闻名，是多产的短篇小说家，曾各获得两次星云奖与世界奇幻奖。

不幸的是，现在看来，整个太阳系也只有人类这一种智能生物，也只有地球这一颗适合居住的行星。如果我们要在小说里涉及人类与外星人的接触或冲突，或者想描写如何在其他星球定居，故事就必须提到星际旅行。因为这些东西，在人类家园的近处都不存在。可是这些恒星，又都比太阳系的其他行星遥远得多：距离太阳最近的半人马座 $\alpha$ 的三星，也在 4.3 光年之外。遥远到了连光都需要 4.3 年才能到达的地步，距离足有 40 万亿 km。其他星星的距离更加遥远。我们所在的银河系是由 2000 亿颗恒星组成的，太阳只是其中一分子。整个银河系呈旋涡形，直径达 10 万光年。其他星系更是远在数百万光年之外。

据我们当前最新的物理学知识，还是没有任何事物的速度能超过光速。也就是说，旅行者（假设他叫汤姆）从地球前往半人马座 $\alpha$ 星，至少也要花 4.3 年，回来还要花 4.3 年。但是，假设汤姆的飞船速度非常接近光速，那么他本人不会觉得旅程有 4.3 年那么长，而只相当于过去了很短时间。理论上，如果飞船速度够快，汤姆完全可以在有生之年周游整个宇宙，只要他不在意回到原地的时候，他原来的世界已经过去了数百万年，乃至数十亿年的时间。

## 12.2 爱因斯坦有没有搞错？

爱因斯坦这个奇怪的预言，说什么在接近光速行驶时钟表会变慢，曾经令很多人对他产生怀疑。[B]其实，他理论的怪异之处还不仅仅是时间延缓这一点，还有相对论预言的长度收缩。一艘接近光速行驶的宇宙飞船，会在其运动方向上缩短。相关的公式其实都很简单。假设汤姆坐上了速度为 $v$ 的飞船，而皮特站在原地不动，看着他飞过。我们让皮特穿上宇航服飘在空荡荡的宇宙空间里，这样我们就不必考虑复杂的重力问题了。再假设皮特手里有一块秒表，汤姆也有一只。两人同时按下按钮开始计时。皮特看到自己的秒表过了一段时间（比如 10s），同时还能透过窗户看到飞船内汤姆手里的秒表。如果皮特的秒表走过的时间为 $\Delta t_0$，他会发现汤姆的秒表走过的时间更短。假设汤姆秒表上走过的时间为 $\Delta t$，那么两个时间满足下列等式：

$$\Delta t = \Delta t_0 / \gamma \tag{12.1}$$

其中至关重要的 $\gamma$ 因子是

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{12.2}$$

伽马因子永远都大于 1，也就是皮特任何情况下都会看到，汤姆的秒表走过的时间更短。表 12.1 列举了不同速度下伽马因子的不同数值。

**表 12.1　伽马因子随火箭速度变化的情况**

| 火箭速度/光速($v/c$) | $\gamma$ | 火箭速度/光速($v/c$) | $\gamma$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0.9 | 2.29 |
| 0.1 | 1.01 | 0.95 | 3.2 |
| 0.2 | 1.02 | 0.99 | 7.09 |
| 0.4 | 1.09 | 0.995 | 10.01 |
| 0.5 | 1.15 | 0.9995 | 31.63 |
| 0.6 | 1.25 | $1-\delta,\delta\leqslant 1$ | $\sqrt{\frac{2}{\delta}}$ |
| 0.866 | 2 | 1 | $\infty$ |

请注意，只有在速度超过光速的 10%以上时，时间上的差异才开始变得明显。皮特测量到的汤姆飞船长度（以及飞船中任何物体的长度，包括汤姆的身高），都会沿着飞船运行的方向缩短。比例与时间延缓的倍数一致。

尽管在速度较低时，伽马因子数值不大，但还是可以测量的。引用爱德华·普赛尔的一句话："个人而言，我相信狭义相对论。假如这套理论真的不可靠的话，我们这里有些非常昂贵的机器，可就会有大麻烦了[46]134。"人们曾经测量过时间延缓现象，而且直到现在，仍然在全球各地的粒子加速器中每天进行测量。不稳定的各类粒子都有各自的生存周期，到时就会蜕变为其他粒子。例如：$\mu$ 介子就是一种粒子，其质量相当于电子的 206 倍。它不稳定，易于通过下列反应进行衰变：

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \bar{v}_\mu + v_e (2.22\times 10^{-6}\mathrm{s}) \tag{12.3}$$

它衰变的特征时间是 2.22 微秒；这是人们在实验室发现的 $\mu$ 介子衰变周期。不过，宇宙射线产生的 $\mu$ 介子会批量冲入地球大气层，它们的飞行速度超过光速的 99%。而对这些 $\mu$ 介子进行的测量表明，它们的衰变周期比实验室数据长了 7 倍有余，正如相对论预言的情况一样[233]。我读研究生的时候，亲自做过这个试验。而我们圣玛丽学院本科三年级的高级实验课上，也要完成这项实验。在粒子加速器中对各种粒子所做的试验，也证明了同样的结论。伽马因子能够延长粒子的寿命，而无论我们给粒子施加多少能量，都不可能让它超过光速。这值得注意，因为在高能加速器中，有些粒子的最终速度，已经仅仅比光速慢 1cm/s。一切数据都跟相对论预言的情况一模一样，偏差远远小于 1%。

那么，用真实钟表实测的结果又怎样呢？是的，这样的试验也有人做过。完成这项试验的难度显而易见：对于常见的速度为每秒几百米的飞机而言，伽马因子与1之间的区别仅仅有 $10^{-13}$。要测出区别，就必须确保试验的时间足够长，因为原子钟的准确度仅有 $10^{-12}$～$10^{-11}$s。确保足够长的实验时间，就是因为钟表之间读数的区别会随着时间的流逝而越来越大。在20世纪70年代进行过这样的测试：两架装有原子钟的飞机环绕世界飞行，其读数被拿来与地面的钟表进行对比。爱因斯坦非常顺利地通过了这场飞行测试。这项实验的一大难点，是必须把地球的自转考虑进飞机的飞行速度之内。为此而采用了两架飞机。其中一架从东向西飞，另一架从西向东[252]。这听起来像是很抽象的事情，但实际上已经成了我们当代科学技术的重要组成部分。相对论是一个产值数十亿美元的产业的理论基础——它就是全球卫星定位系统（GPS）。

GPS通过三角学方法确定地面事物的位置：围绕地球的同步卫星向地面发送带有时间戳的信号，通过对比信号中的时间戳和地面收到信号时的时间，就可以确定地面对象与卫星之间的距离，只要用光速乘以两个时间的差值即可。通过使用至少四颗卫星发出的信号及卫星本身的位置数据，就可以用三角学方法确定地面的一个位置。不过，由于相对论已经说明的道理，卫星上的钟表与地面的钟表转速不同。事实上，在此过程中有两个影响因素，一是由于运动产生的相对论时间延缓作用；另一种是引力造成的引力时间延缓。引力时间延缓，是指在引力势能阱里的位置越深，钟表减慢的幅度就越大。在卫星上，引力时间延缓会使那里的钟表比地面钟表更快，而相对论时间延缓作用，又会使它比地面的钟表更慢。引力时间延缓作用的影响比相对论时间延缓作用大两倍，但在计算卫星钟表调整幅度时，两方面的因素都需要考虑到。其总体影响并不大，大约仅有十亿分之三。但如果不考虑相对论影响，全球卫星定位系统不到一小时就会无法继续工作[146]68。下面我们来引用阿尔弗雷德·海伊克在他编写的教材《GPS卫星测绘》一书中的一段话：

> 在GPS测绘工作中，相对论的影响至关重要。但幸运的是，我们能精确计算出它发挥影响的程度……[钟表时间快慢的差别]对应于每天增加38.3μs的差别，同步轨道中的钟表显得更快一些……纠正[这种影响]的方式，是在工厂中把用于卫星的原子钟频率调整为10.199 999 954 3MHz[原来的基本频率是10.23MHz]。

这段话可以说明两件事：首先，它用施工手册一样枯燥的语言清楚地表明，相

对论的影响是如此普遍，以至于工程师们时时刻刻都要留意它造成的影响，并应用于数亿人每天使用，为世界经济贡献了数十亿美元的体系中；第二，它表明了无线和微波工程界令人印象深刻的严谨程度。所以，下次有人当你的面说爱因斯坦是疯子的时候，你可以引用咱们这本书，当面驳斥得他体无完肤！

## 12.3　若干疑难之处

海因莱因作品《群星时代》犯下的错误之一，是当"刘易斯和克拉克"号飞船接近光速时，两兄弟之间的心灵感应开始面临困难。下面是汤姆的台词：

> 当速度达到四分之三光速时，[皮特]开始报怨我说话拉长腔，而我开始觉得他语速过快。等飞船速度达到十分之九光速时，语速失常的比例大约是 2∶1。不过，这时我们两个都已经意识到问题所在。我于是故意加快了语速，而他也把语速放慢了下来。
>
> 等到飞船速度为 99%光速时，语速失真比例已经高达 7∶1，我们费尽心机，也仅仅是勉强可以保持交流，而在那天晚些时候，我们已经完全无法沟通了。[113]第11章，"错失"

这儿的情节乍看合理，却很不幸地违背了狭义相对论的一条最基本法则。相对论之所以得名，就是因为任何观察者所得到的测量结果，都只相对于他本身成立，而不适用于其他任何人。奇怪的事情在于：在汤姆看来，他的钟表在正常计时，同时皮特的钟表变慢；与此同时，在皮特看来，也是自己的钟表正常，汤姆的钟表变慢，两者涉及的伽马因子相等。这的确非常奇怪，以至于有一次讲课的时候，我班上的一名女生缓缓摇头，面无表情地声明说："不对，这老师绝对搞错了。"其实，这就是爱因斯坦相对论的两大基本观念之一：无论采用何种参考系，你都无法真正确定自己到底是在匀速运动，还是静止在原处。假如真的出现皮特测出汤姆的钟表变慢，认为汤姆在移动而自己保持静止，同时汤姆也测出皮特的钟表变快，那么这就可以证明汤姆在移动，而皮特保持静止。这是不可能做到的，因为两人一定都觉得对方的钟表变慢了。[C]（具体究竟是为什么、理由何在，都超过了本书能够讲解清楚的范围。有兴趣的读者可以找些关于相对论的专门书籍来看，其中有些书的作者就是爱因斯坦本人[198]。）相对论的另外一条原则，也就是导致时间延缓效果的那一条，就是无论汤姆和皮特彼此相对运动的速度有多快，他们测出的

光速都是一个恒定值。

海因莱因这部小说中的最终问题，来自两兄弟用超过光速的心灵感应能力交流的设定，这违背了狭义相对论的假设前提。如果我们把 $v>c$ 的一对数值代入伽马因子计算公式，会得到一个负值的平方根，也就是一个虚数——这意味着我们不能这样做。有些人试图用聪明的方法绕过这一问题，但如今的大多数物理学家，都相信光速是整个宇宙间速度的极限。

这样就引发了另外一个问题：旅程结束时会怎样？汤姆变得比皮特年轻吗？如果运动的效果是对称的，为什么一定是其中一个变得比另一个年轻，而不是反过来呢？

过去，关于这个问题的讨论简直吵死人。回答却很简单：是的，时间延缓的确是对称的效果。但却包含了不对称的因素，这就是他们的加速度。静静待在地球上的皮特没有加速。而汤姆自从踏上飞船，就开始加速了。即便加速仅占航程的一小部分时间，它所带来的区别也足以让汤姆变得比皮特年轻。让我通过一个例子来证明一下。这个例子根据沃尔夫冈·伦德勒的著作《狭义相对论》编写。首先来罗列一下假设前提：

- *汤姆要去的是半人马座 α 星系统，距离是 4.3 光年。*
- *经过短时间加速之后，他乘坐的宇宙飞船能够达到光速的 86%。（我们暂且无视汤姆在加速过程中变成肉酱的风险）*

以 86%光速航行，汤姆需要大约 5 年时间到达，然后再花 5 年才能回来——这是皮特的钟表测出的时间。伽马因子几乎是正好等于 2，所以对汤姆而言，他需要大约 2.5 年时间到达，2.5 年返回。也就是在回来以后，他应该比皮特年轻 5 岁。这是从皮特的角度看问题。那么，从汤姆角度看呢？

伦德勒非常睿智地指出，不管加速过程多么迅速，等到它结束时，汤姆就已经走完了前往目的地旅程的一半[198]31。这是长度收缩效用的结果。从汤姆角度看，加速过程结束以后，太阳正在以 86%光速离开自己，而半人马座 α 星正在以同样的速度向他接近。由于相对论导致的距离收缩，两者距离缩短了 50%。在汤姆看来，他的钟表没有问题，只是距离缩短了 50%。[D]

## 12.4　相对论背景下的匀加速运动

在狭义相对论语境下，不存在自始至终的匀加速运动。原因很简单：在持续线性加速情形下（初始条件是 $v=0, t=0$），时间点 $t$ 对应的速度为 $v=at$。因此，在

足够长的时间过去之后(例如 $a=g$ 情况下的一年以后),宇宙飞船的速度就会超过光速了。所以,我们在设定加速度时一定要多加留意。

身在加速中的宇宙飞船上的宇航员,会感觉到重力的存在。我们将以此为标准定义加速度。

(1) 宇航员在地球的重量 $W_0$。

(2) 等上了宇宙飞船之后,可以在他(她)身下放一架天平,称取她在加速时的实际重量。

于是,宇宙飞船“实际”的加速度就是:

$$a = g\frac{W}{W_0}$$

由于 $g$ 约为 $10\mathrm{m/s^2}$,如果在飞船上称得的宇航员体重仅有地面数值的 10%,那么宇宙飞船的加速度就大约是 $1\mathrm{m/s^2}$。

事实证明,如果我们在计算此类数据时,采用光年作为距离单位,年作为时间单位的话,就可以省掉很多麻烦。此时,光速可以记作 $c=1$ 光年/年。在这套计数系统中,$g$ 几乎正好等于 1 光年/年$^2$。这会大大简化我们的计算。让我们假设以下前提条件:

- 飞船从静止状态启动,沿直线方向以 $1g$ 的恒定加速度出发;
- $x$ 是飞船行驶的距离;
- $t$ 是用地球表面的钟表计量的,从行程开始以来的时间;
- $v$ 是 $t$ 时飞船的速度;
- $\tau$ 是飞船上已经过去的时间;

那么,飞船的运动合乎下列方程:

$$(x+1)^2-t^2=1 \tag{12.4}$$

这在相对论中常常被称作“双曲线运动”。因为如果以 $x$ 和 $t$ 作为两轴画出函数图像,图形是双曲线。

飞船上的任何数据,都可以用包含时间变量的等式来表示:

$$x = \cosh(\tau) - 1 \tag{12.5}$$

$$t = \sinh(\tau) \tag{12.6}$$

$$v = c\tanh(\tau) \tag{12.7}$$

对不熟悉表达式的同学解释一下,cosh、sinh 和 tanh,分别是双曲正弦、双曲余弦和双曲正切:

$$\cosh(x)=\frac{e^{x}+e^{-x}}{2}$$

$$\sinh(x)=\frac{e^{x}-e^{-x}}{2}$$

$$\tanh(x)=\frac{\sinh(x)}{\cosh(x)}=\frac{e^{x}-e^{-x}}{e^{x}+e^{-x}}$$

## 前往宇宙尽头的旅程

让我们规划一次行程，去往最最遥远的远方。就算是十亿光年的路程，也要始于足下，不是吗？相对论加速的可爱之处在于，尽管没有人能超过光速，字面上看，走遍了整个宇宙十亿光年的距离，就要乖乖花费十亿年以上的时间，但是由于时间延缓作用的影响，这段行程对旅行者而言，会显得短暂很多。下面是整体情况的总结：我们上了飞船说走就走，半程时间（以飞船上的钟表为准）保持加速（一半的行程），然后改为减速走完剩下的路程。这时候我们已经走出了多远呢？地球上又已经经过了多长时间？我们半程换挡的时候速度有多快？在表 12.2 中，$x_{end}$是飞船在行程终期走过的距离；$t_{end}$和 $\tau_{end}$是旅程结束时地球和飞船上各自已经过去的时间，$v_{mid}$是中间点的飞船速度。

**表 12.2　相对加速度下的时与空间**

| $\tau_{end}$（年） | $x_{end}$（光年） | $t_{end}$（年） | $v_{mid}/c$ |
|---|---|---|---|
| 0.5 | 0.06 | 0.5 | 0.24 |
| 1 | 0.26 | 1.04 | 0.46 |
| 2 | 1.08 | 2.36 | 0.76 |
| 3 | 2.7 | 4.26 | 0.91 |
| 4 | 5.52 | 7.26 | 0.96 |
| 5 | 10.26 | 12.1 | 0.99 |
| 10 | 146 | 148 | $1-\varepsilon$ |
| 20 | 22 000 | 22 000 | … |
| 40 | $4.85\times10^{8}$ | $4.85\times10^{8}$ | … |
| 50 | $7.2\times10^{10}$ | $7.2\times10^{10}$ | … |

结果一目了然：如果有能够保持 1$g$ 加速度的飞船，人们只要几年就能够到达

最近处的星球。到达银河系中心也只需要 25 年，40 年就能到达其他星系，50 年就能找到宇宙的尽头。也就是说，宇宙尽在我们的掌握之中……不幸的是，这样的行程需要消耗的能量数量极为巨大。至于说大到何种程度，我将留作习题，让聪明的读者们自己去发现了。

**注：**

A. 这部小说的一个有趣之处，是考伯尔经历的时间延缓多半都是闯入银河中心附近的巨大黑洞造成的。引力导致的时间延缓以广义相对论为基础，本章暂时还没有谈到。

B. 事实上，奇思妙想网站(crank. net)，一个自称提供"帮你寻找网络歪才、怪才和疯子"的网站，列举了不下 48 个专门网址，它们都致力于证明相对论(广义及狭义相对论)是错误的。

C. 我一直很小心地避免"钟表看起来像是在变慢"一类的说法。因为这样说的潜台词，就像这一切都只是假象一样。这样的理解才是错误的。要人类能想到的所有试验中，钟表都真的变慢了。

D. 皮特钟表上的这个读数较难解释，但如果综合利用时间延缓理论和汤姆视角上的多普勒效应，依然可以证明皮特的钟表响了更多次。

# 第 13 章
# 超光速旅行和时间旅行

常规空间深又远，
外面围着个超级空间。

——太空宝宝的鹅妈妈童谣

## 13.1 现实主义的答案

超光速旅行和时间旅行，两者都是不可能的。

## 13.2 非现实主义的回答

写这样一章的时候，我的立场很尴尬。这有几个方面的原因：

- 我个人并不认为，以物理学定律为基础的世界可以容许超光速旅行和时间旅行这类事情的发生；
- 但是，这两个主题又都在科幻小说中曝光率极高，常出现于众多小说作品中；
- 更麻烦的是，最近出版过无数涉及这一话题的图书，我能写的内容，都已经有其他作者写过了，而且比我写得更好。

超光速旅行是众多科幻小说中的重要组成元素，其原因非常简单：即便是我们实现了非常接近光速的飞行速度，星际旅行依然需要巨量资源和极为漫长的时间。恒星之间距离的遥远程度，已经大大超过人类惯常的时间观念能够轻易应对的范围。有几种不同的方法，可以用来绕过这一问题：

- 完全无视相对论。如果我们假设相对论是一个错误，那么我们就可以随意加速。现在没有人对这套方案太热衷，因为我们有众多有力的证据证明相对论的正确性。最初版本的《星际迷航》系列，貌似完全无视相对论，尽管我也知道，写下这样的论断，势必招来大量该剧粉丝寻章摘句，强调我的指责毫无道理。另一部超现实电视剧《太空1999》，肯定是展示了一个没有相对论的世界，尽管这远不是该剧最脱离现实的地方。人称“博士”的E. E. 史密斯①在“棱镜人”系列中，提出了一种“超惯性”发动机，神奇地绕过了相对论影响，可以加速到接近无限快的速度[221]。他并没有无视相对论，而是试图绕开它，但这同样是不可能的。
- 启用“快子”。快子是一种完全假想出来的粒子，从来都没有任何人见过它。人们假设它可以超过光速[80]。几乎可以100%断定，这东西不可能存在。有一位物理学家罗伯特·埃里希相信它们存在。他怀疑，中微子可能就是快子。他很可能搞错了，不过他的想法还是很有意思[79]。
- 启用某种类似于“量子纠缠”之类的概念。这很可能就是厄休拉·勒古恩设想“安息波”的理论基础[145]。它来自人们观测到的一个事实：在量子力学中，两个“纽结”在一起的波形函数“坍缩”的时间是完全同步的——至少在某些参考系内如此。但这并未违背相对论，因为（量子力学的哥本哈根解释认为）波形函数的坍缩无法传递信息及能量。[A]关于“安息波”，我们暂时就说这么多。
- 使用超空间。超空间是类似于现实空间的多维世界，对它的存在方式缺乏明确界定。我感觉，利用超空间进行“穿越”的大致意思，是那里的光速无限快，并且超空间与现实世界存在点对点的对应关系，如果飞船进入超空间，再稍微挪动一下，回到现实世界的时候，就已经出现在几光年之外了。使用这一概念的图书包括《上帝眼中的微尘》及其续集、拉里·尼文的作品《已知空间》、电视剧集“巴比伦五号”等，重映的《太空堡垒卡拉狄加》可能

---

① E. E. 史密斯（Edward Elmer Smith，1890—1965），美国食品工程师（擅长制作多纳圈和面食），早期科幻作家。最著名的作品是《棱镜人》和《云雀》。有人称他为“太空歌剧”之父。

也包括其内。

- 使用时空折叠和虫洞概念。在广义相对论中，空间存在的某些方式，就像是（在高维度空间）被其中的质量撑变形了的橡皮膜一样。很可能会出现这样两个点：尽管在橡皮膜表面，它们之间的距离非常遥远，但在与橡皮膜垂直的方向上，只隔着很短的距离（从高维视角来看）。如果在这两点之间存在一座"桥梁"，就能够只用很短时间到达目的地。比沿着"橡皮膜"前往的距离近很多倍。我第一次读到这样的说法，是在麦德琳·恩格尔的作品《时间折痕》中，作者错误地把这种运动方式称为"超立方"[152]B。这是唯一有些真正科学味道的超光速旅行方式了；研究相对论的物理学家基普·索恩①应好友卡尔·萨根之托，研究过能否借此实现超光速旅行的问题，卡尔当时在为小说《接触未来》[209]做准备。虫洞就是利用空间褶皱的实际渠道，因为它们就是前面提到的，连接两点之间的那座"桥梁"。

关于利用虫洞实现超光速旅行的问题，基普·索恩曾经发表过大量相关言论，我会把他的观点简单转述一下。为讲透这一主题，我需要阐述一些爱因斯坦相对论中的细节。

## 13.3 为什么超光速就意味着时间旅行

常常有人说：超光速就意味着回到过去的时间旅行。但人们却很少解释原因。这是因为，要真正搞懂这件事，就需要对相对论有较为透彻的理解。在狭义相对论的语境下，另一个事实就是：如果承认有物质或能量的速度超过光速，就会引发一些悖论。这是真正的悖论，不是像上一章提到过的"双生子佯谬"这样貌似悖谬实则正常的现象；而是只能通过放弃相对论某些基本原则才能解决的疑难。广义相对论有没有解决这些疑问，并使超光速旅行和时间旅行成为可能，现在还不清楚。目前，让我们暂时还是把话题限制在狭义相对论范围内。

首先，我们来讲几个相对论中的基本概念。一个"事件"被定义为任何发生过的事情，加上它发生的时间和地点。通常来讲，我们说的"事件"都是在较短时间内结束的，这样才能较为精确地指明它发生的时间。现在假设有两个事件，完全

---

① 基普·索恩（Kip Stephen Thorne，1940— ），美国理论物理学家，他的主要贡献在于引力物理和天体物理学领域。索恩和英国物理学家斯蒂芬·霍金，以及美国天文学家、科普作家、科幻小说作家卡尔·萨根保持了长期的好友和同事关系。克里斯托弗·诺兰 2014 年的科幻电影《星际穿越》，也邀请他参与了制作。

没有想象力的我打算称第一个为 A，第二个为 B。假设 A 是点燃引线，B 是鞭炮炸响。那么，A 是否导致了 B 的发生？

这是个有趣的问题。让我们给鞭炮加一根长长的引线，比如说长达 5ft，燃烧速度为每秒钟 1ft。如果鞭炮在引线点燃之后 6s 炸响，那么点燃引线的确可能是鞭炮炸响的原因。如果两个事件的间隔只有 4s，那就可能不存在因果关系，因为时间不够烧完引线。不过（理论上）我们也可以造出一条燃烧速度更快的引线。

现在我们来造一条超长引线：它的长度为 5 光秒（ls），折合约 150 万 km。我们会用光来引燃这颗爆竹，假设我们有某种光纤或者有可能传递信号的某种激光，并且在爆竹上安装了对应的感应器。信号传送的速度是每秒钟 1 光秒，就是需要 5s 将光信号传到这颗爆竹。跟上次一样，如果爆竹炸响的时间是 4s 以后，那它不可能是引线点燃的，而如果炸响的时间是 6s 以后，则两件事可能存在因果关系。这个例子的意义在于：根据目前我们人类掌握的物理学知识，我们不可能把引爆信号的速度进一步加快至超过光速。如果爆竹炸响的时间是 4s 以后，那么就根本不可能与引线点燃事件存在因果关系。A 不可能是事件 B 的原因。

这个例子的有趣之处在于：在因果关系不成立时，A 并不一定需要发生在 B 事件之前。从哲学意义上讲，既然 A 根本不可能影响到 B，它们之间的时序关系就完全无关紧要。令人吃惊的是，这条哲学意义上的原则，也被融入了相对论的数学体系中！正如我们在前面的章节中已经了解的，在相对速度不同的人眼中，时间推进的频率并不相同。如果事件 A 与 B 之间不存在因果关系，那么在一种参考系中，A 就可能早于 B；而在另一个参考系，B 也可能早于 A；还可能存在 A 与 B 同时发生的视角。这被称作“相对同步”，是狭义相对论中最深奥也是最有趣的细节之一。

现在我们来改一下规则，让引线燃烧的速度快于光速，比如光速的两倍。那么，爆竹就将在引线点燃之后 2.5s 后炸响。问题是，这个时间对应于哪个参考系？在一种参考系中，爆竹是在引线点燃之后炸响的，另一个参考系里可能是在点燃引线之前；再换一个参考系，又可能变成了两个事件同时发生。这件事情影响在于：假设我们接受狭义相对论为终极真理，就会出现有些事件之间无法排序的现象。对这个问题的兴趣的读者，我可以推荐两本书：一本是大卫·莫敏的《论时间》；另一本是爱德温·F. 泰勒与约翰·阿奇巴尔德·魏勒合写的《空间时代物理学》，尤其是关于洛伦兹变换和关于“大背叛”的总结[165,234]。

在没有超大质量天体的宇宙空间里，比如恒星之间的广大鸿沟，狭义相对

论的确可以完全适用。有众多值得信赖的实验结果，让我们有充分理由接受狭义相对论的推论和预测结果。全球各地加速器中数以万亿计的粒子不可能全都搞错，不是吗？人们只能有一个结论：在正常空间，飞船的速度就是不可能超过光速。

作品中出现了超光速对象的科幻小说作者，通常都有一个默认的假设前提，那就是存在一个优先参考系，连时间和空间本身都是由它来定义的。这里说的时间和空间，通常是指地球表面测量到的结果。罗伯特·海因莱因在《群星时代》里，就做出了这样的假设[113]。写到飞船接近光速时，他说汤姆说话的声音让皮特觉得慢；而皮特的声音又被汤姆认为太慢。《上帝眼中的微尘》一书中的阿尔德森发动机，可能是用更为隐晦的方式使用了这样的设定。下面的引文来自拉里·尼文与杰里·波奈尔的文章《上帝眼中的微尘创作之路》，作者解释了小说中发动机的使用方法。

> 进入和离开连续宇宙（超空间的一种）是有条件的。要离开连续宇宙，你必须保持与进入时完全一样的潜能……你还必须在一系列复杂参考系中具备零动量。细节我们在此将不再赘述。[186]

我记得自己最早在《银河》杂志读到这段文字的时候大约是10岁，那时非常想知道这种发动机运作的细节。现在想来，阿尔德森发动机实际上明目张胆地践踏了狭义相对论，给世界强加了一层更高级的参考系统。时间、空间和能量等概念都来自这个参考系。这一次，飞船也无非是从一个地点消失，然后在另一个数光年以外的地点出现，“瞬间完成”。不过，其实还是会存在其他参考系，那里的飞船还没有在一个地方消失，就已经在另一个地方出现。

物理学家们喜欢因果关系：他们希望能确定事件A导致事件B，而且A要毫无争议地发生在B之前。因此，直接超过光速的想法显然也就不可行了。那么，还有其他办法吗？

## 13.4 广义相对论

如果我们的世界允许出现超光速，我们就只能求助于广义相对论。广义相对论描绘了在考虑到质量影响之后，时空如何出现“扭曲”，以及空间扭曲对有质量的对象周边粒子运行线路的影响。

讨论这一问题过程中常用的一个比方，就是把宇宙比作一个铺开的、巨大的厚橡皮垫，星星就像放在垫上的保龄球。如果我们拿一颗小玻璃球在橡皮垫上滚，经过保龄球附近时，由于橡皮垫被压得下陷，玻璃球就会偏离直线运动方向，而这与保龄球与玻璃球之间的引力无关。玻璃球可以代表飞近一颗恒星的行星或飞船。这个比喻并不十分恰当，因为我们讨论的对象是时空中的扭曲，而不仅仅是空间的变形。随着它更加靠近恒星，宇宙飞船上的钟表会变慢，因此会跟远处钟表的示数不一致。

想象中，时空的扭曲将可能会造出一条捷径，可以绕过通常意义的空间。我在这章会更多地使用语言描述，因为相关的数学计算非常难。我会在可能的时候引入数字和公式。

广义相对论经历的最早验证之一，就是大质量物体导致光线偏转的实验，实验目标是太阳。1919 年，阿瑟·斯坦利·埃丁顿在日全食期间拍摄了太阳近处星星的照片。六个月之后，当这些星星已经不在太阳附近，人们发现，它们的视觉位置发生了明显的变化。这并不奇怪，即便是根据牛顿的万有引力定律，也可以预测出同样的结果。遥远的星星发出的光亮，在经过太阳附近时必然受到其引力的影响而发生弯曲，导致人们误判星星在天空中的位置。但是，牛顿理论和爱因斯坦的体系，在偏离程度数据方面的结果是不一样的。根据爱因斯坦理论算出的数据，要比牛顿理论预测的对应数据大两倍。如果有人想要把这一细节写进小说的话，经过恒星边缘的星光偏转角度计算公式是：

$$\theta=4\,\frac{GM_{\text{metric}}}{c^2R_{\text{metric}}}\tag{13.1}$$

这里的 $G=6.67\times10^{-11}\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$，是通用引力常量，$M_{\text{metric}}$ 和 $R_{\text{metric}}$ 是恒星的质量和半径。下标 metric 表示我们将在此处使用公制计量单位。对太阳而言，公制计量单位表示的质量是 $1.99\times10^{30}\,\text{kg}$ 而公制单位表示的半径是 $6.85\times10^{8}\,\text{m}$。在这个公式中，折射率用弧度表示，1 弧度约等于 57.3 度。用更好用的单位，公式可以化为：

$$\theta=1.77''\times\frac{M}{R}\tag{13.2}$$

其中有 $M$ 和 $R$ 分别对应于太阳的质量和半径（在这个单位系统中，$M_{\text{sun}}=1$，$R_{\text{sun}}=1$），1 角秒（$''$）等于 $1/3600°$。后面讨论外星生命的时候，我们还将频繁使用这些单位。

即便是受到太阳这样大的天体影响，光线偏转的幅度也依然很小。这是因为

太阳周围的时空扭曲幅度较小。给定质量的天体导致的时空扭曲幅度，可以用一组标量计算得出：

$$\frac{GM_{\text{metric}}}{c^2 R_{\text{metric}}} = 2.15 \times 10^{-6} \times \frac{M}{R} \tag{13.3}$$

如果这个数字很小，由于广义相对论造成的影响（空间扭曲和时间延缓）也会比较小，但随着这一数值接近于1，扭曲幅度就会变得很大。如果数字大于1/2，这颗星星就会彻底从宇宙中消失。

## 13.5 引力时间延缓与黑洞

如果行星直径为 $R$，火箭从它表面发射的逃逸速度就将是

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_{\text{metric}}}{R_{\text{metric}}}} \tag{13.4}$$

如果火箭未能达到这一速度，最终就会落回行星表面。如果其初始速度等于或大于逃逸速度，就不会掉落。没有任何物质能够超过光速。如果我们把光速代入上面的等式，对行星直径求解，那么就会得到

$$R_{\text{metric}} = \frac{2GM_{\text{metric}}}{c^2} = 2.9\text{km} \times M \tag{13.5}$$

其中第二个等式，采用了用太阳的质量作为单位的表达方式，也就是说，如果我们把太阳的质量塞进半径小于2.9km的球体中，它就会变成黑色，连光都不能从它的引力场逃逸出来。这是根据牛顿的万有引力定律得出的结论。事实上，爱因斯坦的理论也会得出同样的结果：由于时空扭曲，球体的半径必须用另外的方式来表达，但形式是一样的。如果你想找一份广义相对论的详尽入门指南，我强烈推荐《探索黑洞》一书，作者是埃德温·F.泰勒和约翰·阿奇巴尔德·惠勒[135]。对试图选用黑洞作为小说素材的科幻作者而言，这本书简直是一本完全指导手册。书的难度，大致与大学物理学专业本科高年级相当。

黑洞真实存在。它们是巨大恒星生涯末期演变出来的产物，这些恒星的质量，要比太阳大20倍以上。恒星是一个平衡系统，其内核持续发生的聚变反应产生热量与压力，使其向外膨胀，同时引力作用又使其向内收缩。一旦聚变反应结束，如果恒星质量足够大就会迅速塌缩，像是从我们的宇宙间消失了一样。留下的只有一个“事件视界”，一种单向障碍，它的半径可以用上面的式(13.5)计算得出。一旦进入了这样的区域，你就不可能回到宇宙中的其他地方了。一旦越界，

任何东西都只能无可挽回地被吸入中央地带的奇点，那里有极其强大的引潮力，可以摧毁任何物质，令其在黑洞深处消失。进入奇点的物质最后到底会怎样，人们还无法给出合理的解释。要彻底理解这一问题，需要对重力的量子力学特性有非常透彻的研究。目前人类还没有达到这程度。

黑洞的另外一个神奇特色，就是从旁观者视角看，接近黑洞时的时间会变慢。在“事件视界”时间会进入停滞。但是，跌入黑洞，穿过这条线进入奇点的人却不会感觉到任何异常！假设我们有两个“人”，其中一个（艾尔）坐在距离黑洞很远的宇宙飞船上，另一个（伯特）乘坐的飞船距离黑洞更近。（也就是说，他们的飞船发动机都处于开动状态，在努力避免跌入黑洞。）艾尔飞船上的钟表，会比伯特船上的钟表更快。如果艾尔的钟表测到的时间为 $t_A$，他会发现伯特的钟表经过的时间为 $t_B$。而且

$$t_B=\sqrt{1-\frac{2GM_{\mathrm{metric}}}{c^2 r_{\mathrm{metric}}}}\times t_A \tag{13.6}$$

这是伯特钟表经过的时间。其中，$r$ 是伯特到黑洞中心的距离[235]。如果两位观察者中的任何一位正在向黑洞中心接近，上式就必须做出调整，以反映他们位置的变化。正如所料，随着向“事件视界”靠近，伯特的钟表将会慢到停止。正如我在第 12 章中提到过的，全球卫星定位系统就必须考虑这种引力时间延缓和相对论位移效果，才能确保正常工作。对我来说，这是相对论最为令人吃惊的特色。接近事件视界时的时间延缓现象，曾出现于一些科幻作品中，但并非每一次都准确。

黑洞吸引科幻作者的历史，几乎和它困扰物理学家的历史一样悠久。正如基普·索恩所说：黑洞研究的“黄金时代”是 20 世纪 60 年代，而也正是从 20 世纪 60—70 年代初，黑洞开始出现于主流科幻作品中。阿瑟·克拉克作品《城市与群星》中的“黑日”，很可能就是这一观念的早期运用。小说中的“黑日”是一颗人造恒星，专门用于囚禁“疯狂意念”，它们是一种银河帝国居民创造出来的无形存在物，后来开始与人类为敌，几乎摧毁了整个银河系[53]。如果“黑日”真的算是某种“黑洞”，克拉克就可算作是先知先觉。因为他在作品中写道，一旦黑日被摧毁，“疯狂意念”就会逃脱。小说写作的 20 世纪 50 年代，人们还不知道黑洞会经过霍金辐射过程蒸发。最终，（在恒星灭亡之后很久很久）整个黑洞都会完全蒸发，消失得无影无踪。

杰里·波奈尔的短篇小说《掉进黑洞里的人》，写了一次营救行动，救援对象是一群搁浅在黑洞附近轨道上的宇航员。它们的飞船几乎被黑洞发出的重力辐

射毁掉。故事背景与《上帝眼中的微尘》完全一致，其中的科学细节也较为准确。仅有一个细节例外，就是假设500年后的天体物理学家们完全忘记了有着黑洞的知识。拉里·尼文当然也写过涉及黑洞的小说。包括《想到奇点我就怕》，故事里的宇航员因为掉进黑洞，穿越回到了过去。

黑洞有时也被称为"塌陷星"，在一些科幻小说中被用作实现超光速旅行的渠道。我能马上想到的两个例子是乔·W.海德曼的《永恒之战》和斯坦尼斯拉夫·莱姆的《完败》[107,151]。前一本书已经在前文出现过，第二本书写的是人们试图远赴星空，与一种被称为"昆坦星人"的外星种族建立接触的故事。书中的飞船使用了"重力激光器"（一种使用了重力激光装置的东西，别管它具体什么意思了），以便让塌陷星出现振荡，飞船趁机飞入，或者获得超光速，或者能回到过去。小说中晦涩的语句让你很难猜出到底发生了什么。莱姆是个很有学问的家伙，作品中的这个细节，可能来自于物理学家们关于克尔黑洞所做的研究。

时间旅行、超光速与黑洞之间的关系，与旋转黑洞的爱因斯坦力场平衡问题的克尔解法有关。在任何黑洞的中心都有一个奇点。在这个地方，空间被无限扭曲，任何落入其中的事物都会被扯成碎片，因为同时在无数个轴向被拉扯和挤压。在不旋转的黑洞中，奇点就是一个点，任何落入其中的生命都会被杀死。但是对急速旋转的黑洞而言，奇点则是一个环。对应于进入"奇点环"物体的爱因斯坦力场平衡式很奇怪：它们表明，穿过环形奇点的宇航员将进入一个"闭合时间线"，实际含义就是回到了过去。它们也貌似可以促成超光速航行。但遗憾的是，这种解决方案很不稳定，任何进入环状奇点的物体，几乎肯定都会把它破坏掉，同时导致宇航员丧生[168]。这很不幸地推翻了尼文和莱姆小说中的设定，并让《黑洞》这样人类穿过奇点的电影遭受质疑。

## 13.6 虫洞和"奇异"物质

爱因斯坦方程的有些解法，会得出奇怪的、看似有悖于物理学法则的行为。伟大的数学家库尔特·歌德尔发现了一些方程，它们描绘了一个不断转动的宇宙。在那个世界里，只要能找到合适的路线，就可以无限穿越到过去和未来的任何时间点。因为真实的世界并没有绕着某个中心旋转，人们最初没有太看重这个发现。但是到了1974年，弗兰克·提普勒提出闭合时间线可以出现于无限长且

快速旋转的圆柱体附近。这篇论文的题目是《旋转圆柱与因果律崩溃的可能性》[237]。提普勒证明，如果圆柱体外缘的旋转速度超过 50％光速，就可以用作时间机器。

目前还不清楚，一个足够但有限长的圆柱体快速旋转，能不能发挥同样的作用。提普勒认为可以，但其他人指出他对爱因斯坦方程的解法不符合现代物理学法则的若干问题。提普勒的论文至少在两部 20 世纪 70 年代发表的科幻作品中得到了应用。第一部是拉里・尼文的作品《旋转圆柱与因果律崩溃的可能性》，故事中有好几个外星种族试图建成提普勒圆柱，但结果却被一次接一次的自然灾害阻止[184]。在最后一段，某位科学家正在向他的国王介绍自己的设备时，他们的行星所环绕的恒星突然变成了超新星。这是宇宙的自我防护机制，“它”不希望任何人制造出时间机器。这是斯蒂芬・霍金提出的“时序保护假说”的极端案例。霍金的猜想认为，宇宙本身就不会容许时间机器存在。这本来是科幻小说中的概念，但现代物理学对重力系统的研究也认真考查过各种相关可能性。另外一个故事出现于波尔・安德森的小说《阿凡达》中，这是一部形式更为传统的太空冒险小说，其中的提普勒设备（在文章中被称为“T 机器”）被用于实现超光速飞行[21]。

1988 年，加州理工学院的物理学家基普・索恩应好友卡尔・萨根要求，为后者检查小说《接触未来》中科学细节的严谨性。在小说第一稿中，女主角爱伦・阿奇威用投身黑洞的方式到达一颗遥远的星球。正如我已经讲过的，这个办法行不通——爱伦会被黑洞中心的奇点杀死。为了帮助萨根，索恩认真考虑了爱因斯坦方程的另外一种解，“虫洞”能否完成同样的任务。虫洞是连接时空中两点之间的桥梁（多少有点像一根管子），通过它可以连接宇宙相距非常遥远的两个点。不过，它也要求满足两个先决条件：

（1）从高维视角来看，空间的结构必须像是折叠起来的纸。或者（如果本来不存在折叠）就需要技术发达的文明来人为造成这样的折叠结构。在科幻小说中，这样的创意并不稀奇。海因莱因的小说《太空人琼斯》就提出了用这种方式遨游宇宙的设想，这本书的航天者驾驶它们的飞船穿过“霍斯提安异序点”，在这些地方，空间中彼此相隔很远距离的地方被折叠到了一起[112]。我们来引用小说主角麦克斯向他的女友炫耀的那段话：

> “在我们生活的宇宙中，你无论如何不可能快过光速。如果你做到了，也就闯到了我们的宇宙之外。但是在那些空间叠合的特殊地点，你却有机会离开我们的宇宙，过段时间再回来，而且是出现在很远距离之外。具体远到何

种程度，取决于空间叠合的方式。”

飞船加速到接近光速，然后达到光速，然后在异序点超过光速，“穿冲”到几光年之外的地点。故事的主要情节，是一艘飞船迷路事件，原因是“穿越”之前宇航员计算出现失误。海因莱因再次犯下了假定优先参考系存在的错误：飞船的速度是多少，取决于你所选择的参照物。没有任何有质量的实体能够达到光速，更不要说超过了。这本书创作于 1953 年，至今读来仍觉得有趣。尽管其中也有些显得过时的设定：比如说公元 3000 年的人类还在用二进制代码给电脑编写程序。

(2) 如果宇宙真的是，或者可以被这样折叠，人们还必须有能力维护这种虫洞。莫里斯和索恩发现，这就要求我们使用某种“奇异物质”来构建虫洞。

如果你看到虫洞的标准图示(见图 13.1)，会觉得他们看起来就很需要一个支撑结构。需要某种环或者箍状物固定在边缘，以免出现坍塌。

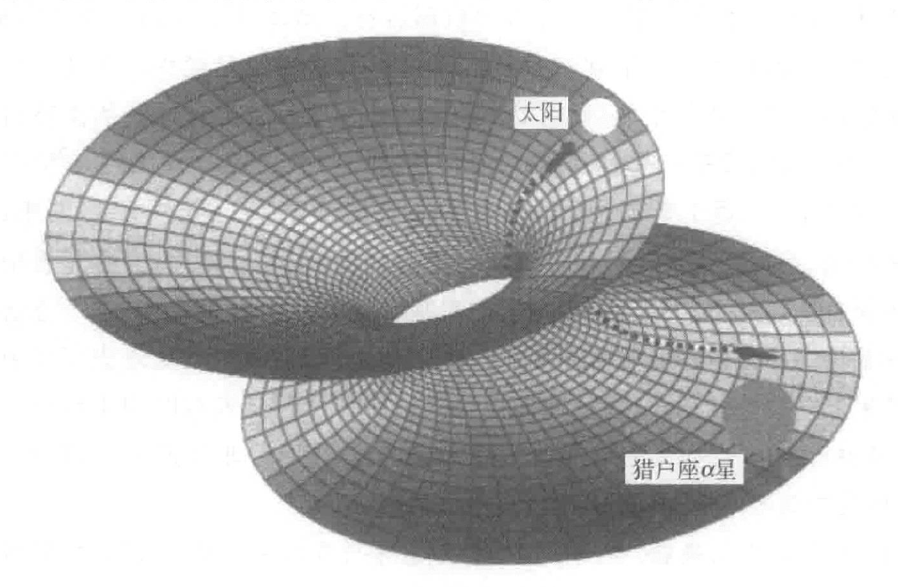



图 13.1　虫洞的时空结构图示

莫里斯和索恩发现，这些环状支撑物必须是一种特殊形式的质量或者能量，其张力需要大于其能量密度。你大概可以这样解释原因：由于这种外在支撑物的质量受到引力场的影响，是可能导致虫洞坍塌的因素，而它的张力就是支撑虫洞、使其不至于塌倒的原因；所以张力一定要更大。但这样说真的是过度简化问题了。莫里斯和索恩称这种物质“奇异”，是因为它完全不同于我们已知的任何物质材料。在前面的章节中，我们讲到过一种完全依靠张力支撑的结构，也就是太空

电梯。虫洞也是一个完全依靠张力支撑的例子，只不过还要更加极端。让我们来定义一下物质的“奇异性”，将其作为一个无量纲参数：

$$\eta=\frac{Y_{max}}{\rho c^2}=h\times\frac{g}{c^2} \tag{13.7}$$

$\eta$ 的数值越小，对应的物质就越常见。$h$ 是第5章中定义过的折断高度，也就是在有重力的环境下用某种材料可以制造出来的最大长度。碳纳米管是具有最大比强度的材料，因而也具备最大“奇异性”。其 $h$ 值 $\approx 10^6$ m，或者说奇异参数为 $10^{-10}$。换言之，由于地球重力加速度仅有1光年/年$^2$，奇异参数可以用一个非常简单的形式表示：

$$\eta=h(\mathrm{LY}) \tag{13.8}$$

实质上，这个数字就是以光年为单位的裂断长度。要建成虫洞，这个参数必须大于1。也就是必须找到一种材料，能够使自身的长度至少达到1光年，以对抗地球重力。这是一个真正有力的证据，证明任何超光速飞行和回到过去的时间旅行，都需要一些“奇异物质”才能实现[168]。

奇异物质的概念，让我想起北欧神话中用来缚绑芬里斯之狼的神索格莱普尼尔①：制作它的材料有猫的脚步声、鱼的呼吸、鸟的唾液、女人的胡子和大山的根。它细如发丝，却能够缚住世间最凶猛的怪兽[62]。在我看来，用这种神索当材料来保持虫洞开启，真是再合适不过。因此，我打算提出建议，让“奇异物质”改名为“格莱普尼尔纳尼”(即格莱普尼尔的金属，这是我用网上的冰岛字典能够达到的最高命名水平了)。

为保持虫洞开启，科学家们提议使用的材料简直也像神话故事一样离奇。要说明通常所见的材料都不算“奇异”，难度并不大。本书在网络上配套的习题，就详细讲解了常见材料的局限性。“奇异物质”之所以称为奇异，就是因为它们突破了狭义相对论较弱的能量限制。在有些参考系统中，甚至可能出现质量为负的情形[168,169,236]。原因在于，在平行光线穿越虫洞过程中，它们会被变得更加发散。而普通物质的引力透镜效应却能使光线凝聚。也就是说，“格莱普尼尔纳尼”产生影响的方式，有点像是反重力。[C]建造虫洞的一种可选方案是使用卡西米尔真空能量。在量子力学中，真空并不是真正空无一物，而是充塞着忽而存在。忽而不存在的粒子和力场②；只要它们的状态变化够快，以至于没有人能够察觉，就可以被

① 相当于中国神话中的捆仙绳。

② 力场是永远存在的，只不过有虚粒子对不断产生和湮灭。

看作是真空。卡西米尔真空产生的方式是把一小片空间隔离出来。可用的方法之一是平行放置两块高反射率的平板，令两者之间距离为 $a$。1948 年，亨德里克·G. B. 卡西米尔证明了这样的安排能够降低两者之间的真空能量，并产生吸引力[48]。

$$F=\frac{\pi^2 hcA}{1440a^4} \tag{13.9}$$

卡西米尔能量是奇异性的，奇异系数可以达到 $\eta=3$。不幸的是，经典情形下的卡西米尔效应很可能无法实现。在最初推导过程中，卡西米尔偷偷玩弄了一个数学花招，实质上忽视了高能量条件下的计算。但在他无视的限界以上，真空模式会产生一些无法忽视的影响，而平板本身的质量同样不能无视。总之，如果使用实际存在的平板材料来制造凯什米尔真空，从一开始就注定了必然会失败[242]123,124。

我们需要多少奇异物质才能建成虫洞呢？回答这一问题所需的大量数学计算，已经超出了本书能够覆盖的范围。马特·魏泽对虫洞"咽喉"处的张力大小和奇异物质的"质量"做出了如下估计。

它们分别是：

$$M=10^{27}(\text{kg})\times b(\text{m}) \tag{13.10}$$

以及

$$\tau=5\times10^{42}(\text{N/m}^2)/b^2(\text{m}) \tag{13.11}$$

其中的 $b$ 是咽喉处的半径，$\tau$ 是张力，$M$ 是奇异物质的"质量"。魏泽谈及的问题之一，是由于奇异物质的独特属性和时空扭曲的影响，$M$ 并不是严格意义上的质量。不过，这个数字倒是可以用于标示我们所需材料的内能。一个直径仅有 1m 的虫洞，需要的质量就已经相当于太阳系全部行星的质量总和。1m 的直径很可能不够用，那么小的"喉咙"，从中经过的任何物体可能都会被引力潮汐撕成碎片。而此处的张力，也已经远远超过任何材料所能够承受的极限。

用于星际穿越的虫洞还有一个有趣的特性，就是它的质量取决于穿过虫洞的对象的质量。我印象中，还没有任何一位科幻小说家在任何作品中用到了这样的设定。问题的关键在于：物理学中的几大守恒定律，在自然界随时随地发挥着影响。也就是说，我们总会认为质量和能量总体守恒。不过，它们的守恒也对应于局部：你不能简单地要求 10 000kg 物质在一处，比如太阳系消失，然后这 10 000kg 物质又在另一个地方（比如 600 光年外的猎户座 $\alpha$ 星）同时出现。为什

么呢？因为“同时”本来就是一个相对的概念。在一种参考系中，它们是同时消失和出现的。在另外一种参考系中，消失和出现之间会有一点时间间隔。在第三个参考系，飞船还没有在太阳系消失，就已经出现于猎户座$\alpha$星附近。理查德·费曼是这样总结相关规律的：如果你有一个盒子，里面存在一定的质量—能量，盒子中质能数量发生变化的唯一渠道，就是你让一部分质量穿过盒子的六个面[81]63~65。

让我们考虑虫洞两端的情形。在两端各放置一个盒子。质量为10 000kg的宇宙飞船从太阳附近的虫洞入口进入，在猎户座$\alpha$星附近的出口出来。那么，在太阳附近的观察者看来，就是有10 000kg的质量从太阳附近的盒子出来而且没有回去。如果我们相信质能守恒，太阳附近的虫洞入口就刚刚得到了10 000kg的质量。猎户座$\alpha$星附近的另一位观察者则看到10 000kg物质从恒星近旁的虫洞出口出来。也就是这颗行星旁边的虫洞出口，刚刚失去了10 000kg质量。在广义相对论情况下，这些过程都是经得起严格检验而能够成立的[242]111。在这本书里，魏泽还提出了一个自己没有回答的有趣问题：如果虫洞失去的质量过多，导致其本身质量变成负值，那该怎么办？

一个系统中的总电荷也像质量一样守恒。如果一个正电荷进入虫洞，它的电场线仍会从虫洞入口延伸出来，使它在太阳附近的观察者看来，貌似一个正电荷。但是当这个正电荷在虫洞另一端出现时，其电场线却会被聚成一束，让猎户座$\alpha$星附近的观察者“觉得”它是个负电荷。约翰·惠勒曾一度提出，整个宇宙之所以在电荷方面呈现为中性，就是因为在最基本的层面上讲，电性实际上是不存在的。所谓电荷，不过就是虫洞两端之间的电场线。这个猜想也许并不能自圆其说，但思路还是很不错的。

人们能使用虫洞进行时光穿越吗？是的，可以。基普·索恩展示了这样一个过程：如果你选择虫洞的一端，使其加速离开另一端，然后再返回。那么走完这一遭的端口，经过的时间就比另一端更短。这个其实就是双生子佯谬的另外一种形式[169]。此时，如果从刚刚活动过的端口进入，从另一端出来，人就可以回到过去。很奇怪的是，这几乎完全是《群星时代》中写到的情况。假设（在没有其他选择的情况下）汤姆和皮特的头脑之间用某种虫洞变体连接了起来。汤姆脑中的想法会传导给年轻数十岁的皮特，至少在汤姆“返回”时，距离皮特的头脑足够近的时候。

不过，这个方案同样有漏洞：霍金提出的“时序保护假说”认为，我们的宇宙不可能容许时间机器存在。看起来，被虫洞强化的真空波动区域，一旦开始具备时

间机器的属性，(很可能)就会马上被破坏掉。意思就是，一旦汤姆到皮特的距离足够近，他们两人的头脑就会同时被真空中突然产生的高能粒子和伽马射线烤焦。

## 13.7 祖父悖论和其他奇闻

> 时间旅行的一大问题，就是人们可能一不小心就变成了自己的祖父或祖母。而对那些思想开放、关系和谐的家庭来讲，成为自己的爸爸或者妈妈从来都不算什么事儿。
>
> ——道格拉斯·诺耶尔·亚当斯① 《宇宙尽头的餐馆》

因时间旅行导致的种种逻辑悖论，已经催生了很多作品。保罗·纳辛在他很受欢迎的图书《时间机器》[174]中，已经有过详细的论述。这本书的第 4 章题为“时间旅行悖论及其若干解读”，他在其中写到了下面我将谈及的一些问题。我建议任何有兴趣的读者看看这本书。尤其难得的是，他写到了约翰·惠勒和理查德·费曼对电场力学的重新演绎，从而对左右光线传输的麦克斯韦方程提出了“高级”波解(例如来自未来的波)，这是我在本书中不会讲到的内容[250]。这本发表于 1945 年的著作，可以算是基普·索恩作品的“前辈”，也启发了其后一系列作品，其中大多都解决了我们即将写到的“祖父悖论”。正如题目所示，保罗·纳辛的作品不只讨论了时间旅行的物理学含义，还涉及它在哲学方面的影响。我在本章中同样没有写到这一主题。所以说，我们两个的作品，有很强的互补性。他是一位资深科幻爱好者兼科幻作家，所以他的书非常引人入胜，而且引用了大量科幻作品。

我在这部分将写到两个不同类型的悖论。两者相加，大约能涵盖所有科幻小说中 99%的时空悖论。它们分别是：

(1) 涉及从虚无中产生物质、能量或信息的悖论；

(2) 涉及因果律的悖论(常被称为“祖父悖论”)。

涉及物质、能量或信息产生的悖论，具体含义是这样的：如果有人进入时间机器，向后穿梭，比如说回到了白垩纪，那么我们实际上就将看到大量的物质在当下

① 道格拉斯·诺耶尔·亚当斯(Douglas Noël Adams，1952—2001)，英国广播剧作家、音乐家，尤以《银河系漫游指南》系列科幻作品知名。他还参加过科幻电视连续剧《神秘博士》的拍摄工作，撰写了其中一些剧本。

消失。这是物理学中最最重要的质能守恒定律绝对禁止的。此外，1.5亿前年的恐龙“见证人”，则眼睁睁看到一大批对象凭空产生。从那时到现在，中间产生了一些宇宙大爆炸时期并不存在的事物。这会显得我们像是从虚无中得到了一些东西。

不过，这个问题并不难解决。在上一部分我曾经提到，在局部质量守恒定律影响下，10 000kg的飞船从虫洞一端进入时，会使它的质量增加10 000kg。而飞船脱离虫洞的一端也将失去同样的质量。利用广义相对论，可以通过计算飞船经过引力场时引发的“反作用力”来证明上述论断。目前人们唯一能想到的时光机制造方法就是利用虫洞。既然虫洞系统中的质量守恒，那么质能守恒定律就还是安然无恙。时间旅行者进入的端口会获得质量，而他出来的端口会失去质量，整体依旧保持质量守恒。其他守恒定律也没有被违背，比如电荷守恒。同样的规则依然适用，这并不令人感到吃惊。因为穿越回过去已经是超光速旅行：在有些参考系统中，进入虫洞与脱离虫洞的事件在同一瞬间发生，但却相隔很远的距离——例如超过1.5亿光年。我们可以认定，如果时间机器或超光速旅行存在。两者都将满足物理学中的各类局部守恒定律。

信息创造的问题则要更为复杂。这也是众多科幻作者常在作品中用到的情节。假如我去参观伦敦的维多利亚和阿尔伯特博物馆。在一个人迹罕至的黑暗角落里，我在隐蔽处找到一篇论文，其中详细记载了时间机器的制作方法。我制造出了这台机器，用它拜访了1892年的H.G.威尔斯，向他讲解时间机器的制作方法。他把这些指令记录下来，藏在了维多利亚和阿尔伯特博物馆一个人迹罕至的黑暗角落里。现在的问题是：到底是谁发现了时间机器的制作方法呢？这条信息到底是从哪里来的？

在考察这条悖论的过程中，我们必须像物理学家一样看待信息，才能真正理解它。我的意思是说，要从信息中剔除人为因素。想象我们有一个可以用来时间旅行的虫洞，你如果从A端进入，就可以从B端出来，来到比进入A端的时间早一段固定时期的过去。要达到我们的目的，你不用回到很久以前。为精确起见，我们假设只回溯1ms($10^{-3}$s)。在虫洞的两个出口之间放一台计算机，从它的输出系统接一条线缆从A端插入，B端引出，然后再接入同一台计算机的输入系统。我们现在有了一台特别的计算机，它可以输出信息给过去的自己。

现在我们编写了一个简单的程序，让计算机从自身获取输入数据，计算一个简单的函数$f(x)$，然后把计算结果传给输出设备。但是，由于它的独特结构，这个输出结果被传回了过去，成了曾经的那个输入。或者说，此时

$$x=f(x) \tag{13.12}$$

从数学意义上说，这个程序必须输出函数 $f(x)$ 中的一个恒定值。

这里有没有新的信息被制造出来呢？这是个很难回答的问题，尤其是难以确定 $f(x)$ 何时取得恒定值的情况下。举例来说，假如我们编写的函数是

$$f(x)=a/x \tag{13.13}$$

那么输入/输出的 $x$ 都将等于 $\sqrt{a}$。所以我们是用了低于普通方法的计算强度得到了一个平方根。这是一个平常的例子，展示了计算机处理“恒定值问题”的潜力。托德·布鲁恩曾经证明，计算机加上时光机，可以在近乎于零的时间内把很大的数字化为因数乘积的形式[42]。这个结果的有趣之处在于，RSA 加密算法能够成立的前提，就是假设化解因数的算法很困难。（当然，制造时间机器本身也很困难。）我想，利用我们前面提到的恒定值方法，我们可以进一步大幅简化布鲁恩的因数求解算法，只需要使用一个函数：

$$f(k)=k+MOD(N,k) \tag{13.14}$$

这样就可以判断 $N$ 有没有任何因数。

另外一个冒出来的问题，就是选择了适当的函数之后，我们可以把它化为“祖父悖论”。祖父悖论堪称为最经典的因果悖论。假设你的祖父是个超级大坏蛋，是某个大国暴虐的独裁者，一生害死了好几千……不，好几百万无辜的人。作为他的继承人，你召集了全国最优秀的科学家，制造出一台时间机器。你穿越回到了过去，在你父亲出生之前很久把你爷爷这个坏老头打死了。问题是，如果你爷爷从来都没有成为你爸爸的爸爸，你的爸爸又怎么可能把你生出来呢？然后又有谁能造出这台时间机器，来阻止他的暴行？看起来，时间机器天然就有打破因果关联、导致互相矛盾、无法并存的结果出现的能力。[D]

这一次，我们还是先把人的因素放到一边，还是在我们的计算机系统里编写一段新程序：如果它得到的输入是“1”，它给的输出数据就是“0”，反之亦然。这一次，如果我们又把输入与输出线路相连，会出现怎样的结果呢？很容易看出，这个问题得不到令人满意的答案：如果我们向虫洞输入一个“1”，它会返回给我们一个“0”；等到“0”变成输入给它之后，它又会给人们反馈一个“1”，就这样循环往复……我们可以把这款“计算机”做得非常简单。下面是一种电路，它就可以模拟刚才的简单计算机程序所具备的功能。这种电路称为“非门电路”。一个 0V 信号（代表数值为零的输入）会产生 1V 的输出（代表输出数字为 1），反之亦然。非门电路也是从 A 端进入，从 B 端出来，再连回 A 端成为输入信号。结果会怎样呢？

我想，这个悖论可能存在两种解决方案：

（1）时间机器不可能存在。如果我们造不出这种机器，当然也就不会面临这类问题；

（2）时间机器是可以制造出来的，但由于我们机器性能的限制，导致悖论情形不可能发生。

第一种可能性更像是正确的，可是它不好玩。所以我们还是来考虑第二种情况吧。我打个比方，假如你抛一枚硬币，其实朝上的不只有正反面这两种可能，还有第三种可能性——硬币可能会边缘朝下侧立。我们通常以为逻辑电路仅有两种可能状态，0 或者 1，但这只是人们总结简化出来的结果。在现实中，这些电路都是由晶体管做成的，这些设备本身也遵从物理学规律，它们能接收一个连续范围内的输入电压，输出电压也同样是一个连续的范围。计算机中配有选择机制，强行迫使电压升高或者降低。但是在有时光机的环境下，这种选择机制可能会失效。我能得出的价值有限的结论，是在前文所说的情况下，我们的计算机会给出一个新的状态，既不是 0，也不是 1；图 13.2 给出了现实中非门电路的电压反应曲线。理想状态下，我们希望任何 0.5V 以上的输入都得到 0V 的输出，0.5V 以下的输入都得到 1V 的输出。因为实际输出需要根据输入情况持续调整，实际得到的输出也不是我们理想的状况，而是更加“温和”一些。正如图中所示，直线 $y=x$ 与响应曲线存在一个交点。那里就是最终得到的恒定值，也就是我们把电路接入

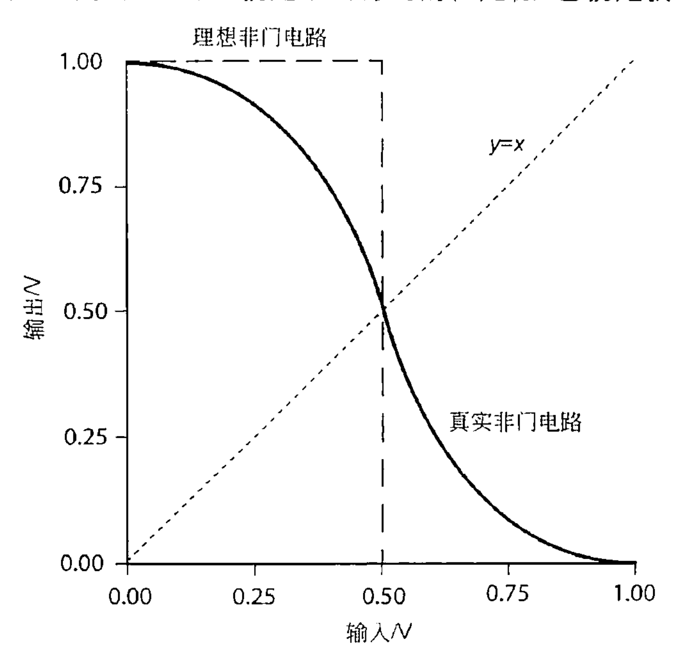



图 13.2　理想与现实中的非门电路

时光机可能得到的输出结果。[E]

看过上面的讲述，见识了回到过去的时间旅行带来的一系列麻烦之后，我再告诉你它还违背熵递增法则，你应该也不会觉得意外了。接入时光机的计算机可以对极大值进行因数求解，只是凭借我们写出的函数让它能不断输出因数。由于能够回到过去不断重来，我们就可以迫使小概率事件发生。这样的设定出现于无数的科幻和奇幻作品中。连罗琳的作品《哈利·波特与阿兹克班的囚徒》也可以从这个角度分析。赫敏的时间穿越迫使一系列小概率事件发生，包括巴克比克脱险、哈利从摄魂怪手中逃脱、小天狼星布莱克逃走，等等[202]。用马特·魏泽的话说："有了闭合时间线，不断进行猜想的机会迫使小概率事件成了几乎确定无疑的事实。"[242]256 或者像拉里·尼文更早以前更富有感染力的表达："你可以手握半自动步枪去拯救耶稣，而且枪还真的有可能卡壳。"[178]

最后我想回答的问题是：如果有某种波可以用超光速传递信息，是否就意味着量子力学理论的失败？这种假想技术，往往出现在作者试图给超光速信息传递一个貌似科学的依据时，比如厄休拉·勒古恩在《黑暗的左手》等作品中设想的安息波通信器，再比如丹尼尔·西蒙斯的《海伯利安》和《海伯利安覆灭记》[145,219,220]。在量子力学中，波函数取代了原子运行轨迹的概念。波函数在时空中的任何一个点都有对应的数值。它能够描述粒子多方面的属性及其出现的概率，包括位置、能量和自旋（量子化角动量）等。根据多数物理学家承认的量子力学哥本哈根解释，认为这些属性在被测量到之前，并不具有确定的数值[102]。这听起来有点奇怪，但实际上没有那么糟糕。只有当我们需要面对两个不同粒子，其属性又受到某个守恒律的约束，而必须具备某种程度的关联时，才会有些麻烦。比如说，由于角动量守恒，我们可以产生出自旋相反的光子（光的组成颗粒）。用物理学的语言讲，如果其中一颗是"自旋向上"的，则另外一颗必然是"自旋向下"的。

现在让我们做一个实验，产生两颗光子，并让它们沿相反方向飞向两位观察者艾尔和伯特，他们之间彼此相距两光秒。（实验设备在两人的中间。）艾尔测定的结果，认为它的光子是"自旋向上"的。因此产生的悖论就是：他知道伯特必然将断定另外一颗是"自旋向下"的，早在伯特把相关信息传来之前 2s 就已经得知。更糟糕的是，我们又想起来，在有些参考系统中，艾尔测定光子的时间要比伯特更早。如果我们相信量子力学的话，伯特的光子在被测量到之前，根本就不具有某些属性值！那么，到底发生了什么事呢？

最早讨论这个疑似存在的悖论的人，是阿尔伯特·爱因斯坦、鲍里斯·波多尔斯基和尼桑·罗森，他们共同发表了可能是量子力学历史上被引用最为频繁的

一篇论文，题为《论量子力学世界图景的完整性》[78]。爱因斯坦不喜欢传统上对于量子波函数基于概率的解读。这篇文章开启了后来被称为"隐变量理论"的学说，在此系统中，基于概率的解读仅仅被看作深层复杂机制的表面现象。隐藏于背后的机制，对粒子的量子力学特性完全可以提供不基于概率的明确数值。这篇文章后来被简称为 EPR① 论文，它在长达数十年的时间里，一直被看作物理学研究中的奇葩。因为不存在任何理想的方法，来判定哥本哈根版量子力学解释与"隐变量理论"的正确性，这种局面直到 1964 年才被打破。当时，约翰·贝尔发表了他的经典论文《论爱因斯坦—波多尔斯基—罗森悖论》("爱菠萝"悖论)[36]。他证明了存在一些验证方法，可以判定传统理论与"隐变量理论"的优劣。一夜之间，EPR 悖论再次回到了物理学研究的中心，因为已经有了用实验判定结果的方法。不幸的是，由此设计出来的实验极为复杂，超出了本书的范围。第一项此类实验于 20 世纪 80 年代早期完成，传统理论完胜爱因斯坦三人组。"隐变量理论"完全无法成立。

于是我们得到的，就是这样一个让人不放心的结果：相关粒子的波形函数"坍缩"的速度超过了光速。由于相对论影响，它在某些参考系会瞬间崩溃，在另一个参考系可能逆序发生。但是，看起来没有任何办法，可以利用这种现象来传递信息。归根到底，问题可以回溯到我们对于信息的定义上去。由于相关光子的自旋可以是"自旋向上"，也可以是"自旋向下"，可能性完全相同，艾尔在同一实验重复多次的过程中，仅仅是测量到了一些随机信息。他知道如果伯特进行了同样的测量，会得到与自己完全相反的结果。但直到伯特把相关信息传递给艾尔之前，艾尔都无法断定伯特真正做过这样的测算。这个核对过程只能是小于或等于光速。

有两个原因使这些结果显得有趣。首先，它使物理学家对"信息"的定义更加严格。尽管艾尔可以断定，如果伯特进行了测量，他将会得到怎样的结果，却无法断定伯特是否做过这样的测算。如果他把测量结果记作一系列二进制代码(自旋向上为 1，自旋向下为 0)，那么他能得到的，也无非是 0 和 1 组成的一系列随机数。第二，近年来，人们已经找到了贝尔的工作能够实际应用的领域。这种量子属性相关的测量主要用于两个方面：一个是编制安全加密方法，随机产生的二进制数，是一次性密钥的理想选择。量子力学的内在机制可以确保这些数字是真正意义上的随机数，完全无法破解[166]。这是好事儿。因为量子相关性也用于量子计算。量子计算的理论基础，是量子系统与计算机科学有着天然的平行对应关系。因为粒子在被真正测量之前，其属性都处于不确定状态，它可以选取取值范围内的任

① 即爱因斯坦(Einstein)、波多尔斯基(Podolsky)、罗森(Rosen)三位的姓氏缩写。

何数值。如果我们对其施加不同组序的物理扰动而不测量属性值，就可以令其遍历所有可能性分支。前文中艾尔和伯特的光子纠缠态，也在量子计算中扮演着重要的角色，尽管其作用机制极为复杂。如果我们可以制造出一台量子计算机，理论上它就可以破解任何公钥加密系统。

目前，公钥加密系统被广泛用来保护银行卡、信用卡和相当一部分全球经济的安全。它的理论基础就是用传统计算机将两个很大的数字相乘，计算难度很低，而将结果恢复为乘数的难度则要高出很多倍。但是，如果有了一台高性能的量子计算机，就可以用肖尔算法为其分解质因数，所有被公钥加密系统保护的信息就会面临威胁。到目前为止，量子计算机完成分解的最大数字才是 21，但这已经算是一个开端。量子信息和量子计算领域现在展开的所有研究，都是意图从哲学和数学意义上实现相对论与量子力学的统一。这段征程还远远没有结束。

我会在最早开始的地方结束关于星际旅行的这个部分，此刻讨论的又是计算物理学。对计算问题的研究，已经从物理学的边缘地带变成了它的核心。因为物理学家们渐渐认识到，信息也和能量、动量一样，是现实存在的物理量。无论是在星际旅行还是在超光速方面，看到这些理论与科幻小说的交叉重合，方面有时候真的会让人感慨万千。科学，有时真的比科幻小说还要更科幻。

**注：**

A. 量子纠缠还曾被用来解释超感体验、透视力和其他特异能力。“量子”这个词儿，常常被作者们拿来应付作品中任何神秘及不可能之事。

B. 超立方体是四维空间中的超级立方体。勒古恩的这个设想，可能来自海因莱因短篇小说中的折叠空间。相应作品名为《某人盖了一座折叠屋》。故事里有一位建筑师盖了一幢房子，形状就像超级四维立方体在三维空间中的投影。然后因为一场地震，这房子自动折叠成四维状态了。我十一岁的时候，真的好想住进这样一幢房子里去。

C. 有点像，大概是……算了，我刚才的主意很糟糕。有这么一篇很有趣的论文，写了在光线穿过虫洞的奇怪异之后，透过虫洞会看到怎样的情形。作者是托马斯·穆勒（不是踢足球的那位），文章题目是《莫里斯·索恩虫洞的视觉印象》。

D. 萨拉·沃维尔还发明了“关于祖父悖论的悖论”，探讨了以暴力方法阻止坏老头暴力行为这套解决方案带来的道德困境。

E. 这是对时光机器功用相对保守的看法。我明确选择了自己的立场，就是时光机不会毁掉因果关联。如果想了解另一方的观点，可参阅马特·魏泽的书《洛伦兹虫洞》[242]。

# 第三部分

# 外星人与外星世界

# 第14章
# 寻找宜居行星

> *有太多的科幻故事，只是硬塞给我们一颗与地球完全一样的行星，仅有的区别就是它既没有地形，也没有历史……其实，创造一个外星世界的过程，本来可以为你的故事提供无数的亮点。*
>
> *——波尔·安德森 《造星指南》*

很多科幻小说中的故事都发生于外星球，而创建一个有外星人居住的外星世界，其历史可能和科幻小说本身一样悠久。硬科幻小说家往往会非常注意天体物理和行星学方面的细节，意图建造出奇诡绚丽而又合乎科学的外星世界。这两方面的目标，非常不容易取得平衡。谈及这个话题，我脑子里马上会想起几个成功案例，比如海尔·克雷门特①的小说《重力使命》中的梅斯克林星球。这是一颗巨大的行星，由于自转速度奇快而变成了椭圆形，它两端的表面重力有地球的三倍，而在赤道线处的表面重力是地球的数百倍之多。再比如拉里·尼文小说《地球的礼物》中出现的普拉泰奥星球，这是一颗与金星类似的行星，整个星球上只有一个点（帽山）适合居住，那是一座高耸出大气层的高山[59,175]。从作家的角度来看，给读者展现一个貌似真实可信又有很多怪异细节的世界，会耗费大量的准备时间，但也是创作乐趣的来源之一。

---

① 海尔·克雷门特(Harry Clement Stubbs，1922—2003)，美国硬科幻界的大师级人物。写作之外，还用乔治·理查德的化名创作太空题材画作。

本章的内容，在很大程度上受到了波尔·安德森先生的文章《造星指南》启发。他的文章最早发表于 1966 年美国科幻小说家协会会刊中，后来被扩写成了一本著名的作家参考手册，由帕伯豪斯出版社出版。我手头的这篇文章，是一份破破烂烂而且来历不明的复印件。我已经不太记得最早讲到这篇文章时的状况了，只是还知道当时应该是十岁左右，而且是第一次接触科幻小说中的科学理念这个话题。如果我没有读过那篇文章，我就不可能写出这本书。不可避免的是，这一章与安德森先生的文章主题完全重合，尽管我们的讲述方式会有所不同。我想建议本书的所有读者，都找到安德森先生的论文来读一读。

## 14.1 阿德勒准则

本章中，我会把话题限定在类似地球的世界范围内，就是指那些能够维系类似于地球生命（有时候被称为"碳基生命"）的行星。有很多关于非碳基生命的猜想，但因为我本人是物理学家而不是生物学家和化学家，所以我计划将注意力集中于自己更为熟悉的领域，重点探讨我们已知生命形式的物理学法则。这依然是一个很大的题目，但已经比我们全面出击的计划好办得多。

我们已知的在地球上的生命，至少需要两个基本条件才能存活：含有大量氧气的大气层，以及处于水的冰点与沸点之间的行星表面平均温度。智能生物产生的前提会更加严格，不过这个问题我们暂时先留到以后再说。

作为起始条件，上面两个基本要求就已经决定了我们寻找的行星类型。在太阳系，共有两种基本类型的行星——类地行星和气态巨星。

- 类地行星也称为岩态行星，包括水星、金星、地球和火星。有些天文学家还把地球的卫星——月球算作这类行星中的一员。它们是太阳系八大行星个头较小、距离太阳较近的几个成员。其主要成分是岩石和金属，大气层要么相对稀薄，要么就根本不存在。这些行星占据的空间，在一定程度上可以算到小行星带，离太阳的距离在 2～3AU 之内，被所谓"冰冻线"环绕。在这条线以外距离太阳更远的地方，各种类型的冰开始广泛存在。由于冰冻线的影响，直到最近，人们一直都以为类地行星只能存在于恒星系统中最靠近恒星的地带。人们猜想，在恒星系统形成的过程中，恒星发出的热量会把易于挥发的冰推向星系边缘，在那里形成气态巨星。
- 太阳系的气态巨星是指星系外围的四颗行星：木星、土星、天王星和海王

星。总体而言，它们都比类地行星大很多，质量为地球的 18～318 倍。它们还主要是由冰和液体组成的，很可能没有固体表面。

其他那些体积较小而不足以称为行星的天体，也存在于我们的星系中。其中包括矮行星——比如近年落魄的冥王星，和五十多颗卫星，其中大部分都围绕气态巨星旋转。这些卫星中的有些成员可能具备产生生命的条件。这催生了一些科幻作品，其中最著名的是《2010：太空漫游Ⅱ》，作者阿瑟·克拉克，核心情节就是木星的卫星欧罗巴（木卫二）上发现生命的事件[57]。电影《阿凡达》的故事也被设定在一颗有人居住的气态巨星卫星上，但却不在我们的太阳系。电影《星球大战 4：新希望》中的反抗军基地，也是在这类卫星上。

直到 1993 年，天文学家们还普遍认为，我们太阳系的格局应该是宇宙中常见的。但是，在科学家开始发现太阳系行星的同时，第三类行星就已经开始浮出水面。它们被称为“热木星”，这类行星的大小与气态巨星相近，但却在很接近于恒星的轨道上，有时候接近到了几小时就能公转一周的程度！大约 25％的已知系外行星都属于热木星。在一定程度上，这反映了我们在探索工具方面的局限：较为靠近恒星的大型行星目前相对更容易被发现。但是，我觉得可以这样说：在这种特别的巨大行星被发现之前，没有天文学家能够预测到它们的存在。

这件事促使我在每学期第一节课上告诉所有的天文学专业新生：

*所有的恒星基本上都是一个样；而行星之间却可以千差万别。*

我这句话的含义，当然不是说所有恒星各方面的属性都完全一样，而是说所有恒星的性质，都可以由两个方面的性质决定：首先是恒星的质量，其次是恒星诞生时的组成成分。这在天体物理学中被称为沃格特-罗素定理。但是，恒星的初始组成成分几乎完全一样（绝大部分是氢，少部分是氦，其他成分比例更少），所以说，决定恒星属性的最大因素就只有它的质量。质量决定其亮度、表面温度和生命周期。

而另一方面，行星的世界却是乱七八糟。尽管我们可以把太阳系的八大行星分成两大类，可是同类之间的个体差异却和它们的相似性一样多。比如说，所有的类地行星之中，只有地球拥有一颗巨大的卫星。地球还是唯一具有板块构造的行星。我们有理由相信，两者都是地球生命繁盛的必要前提。金星的大小和组成成分与地球非常接近，但却具有非常厚的大气层，表面温室效应完全失控。这可能是它的位置更靠近太阳导致的结果。火星表面也有巨大的沟壑，与地球上的大峡谷类似，只是火星峡谷长达 3000mile。它还拥有整个太阳系最高的山峰——死

火山奥林匹斯山。水星表面布满奇形怪状的漫长裂谷，被称作叶状悬崖，这在其他行星表面都没有发现过，如此等等。行星之间有这么大的区别，是因为有众多相关因素会影响到它们的特征，而在有些情况下，原因与结果之间，并不存在清晰的分界。

下面是影响行星特性的若干因素：

- 行星所围绕的恒星类型；
- 行星距离恒星的平均距离及其轨道偏心率；
- 行星质量；
- 行星的大气层；
- 行星的具体组成成分；
- 与星系内其他天体的碰撞史（尤其是在形成初期）。

其中，历史因素的影响尤其重要。波尔·安德森在文章中提到历史时，他想到的很可能是行星表面文明的社会发展史。但从更广泛的意义上说，行星的地质发展史，尤其是行星与其他天体发生碰撞的历史，对其以后形态的影响尤其重大。如果在地球形成过程中，没有在最适当的时间节点遭到火星那么大的天体碰撞的话，我们就不会有月亮这颗卫星。而如果没有月亮，地球上的生命可能就不会出现。

## 14.2 恒星的类型

恒星是一种简单的天体，它所有的性质都是由质量和组成成分决定的。人们很容易想到的问题就是，它都有哪些方面的性质？其实，恒星只有四种性质最重要：

- 亮度。亮度是衡量恒星光亮程度的指标，通常以我们星系的恒星太阳作为参照标准来评判。恒星亮度的取值范围，从仅相当于太阳亮度的1/1000，到比太阳更亮一百万倍之间。
- 恒星表面温度。表面温度为3000～30 000K。太阳表面温度约为5800K，正好在最常见的范围。表面温度会决定行星的总体颜色，其中温度最低的恒星为红色，而温度最高的恒星为蓝白色。
- 主序寿命。天空中大约90%的恒星都是在其核内发生氢聚变为氦的反

应,它们被称为“主序星①”。太阳是一颗主序星。大部分科幻小说中的行星都围绕主序星转动,因为过完主序寿命后恒星发生的变化,很可能将导致行星上生命的灭绝。主序寿命取决于恒星的质量:质量越大的恒星,主序寿命就越短。

- 恒星的衰老与死亡。当恒星耗尽了核内所有的氢以后,也就脱离了主序,进入大畸变时期,此后有三种不同的可能。对质量小于太阳 8 倍的恒星而言,恒星将收缩为白矮星;质量是太阳的 8～20 倍的恒星,会变成爆发的超新星,剩下的是一颗中子星;而最大的恒星会塌陷为黑洞。

恒星模型的建造,基本上算是已经圆满解决的问题了。从 20 世纪 60 年代起,天体物理学家们就开始编写复杂的计算机代码,给恒星系统建模,然后从这些模型出发,将其与观测结果进行大量对比。如果我的读者中有人对这类主题感兴趣,我强烈推荐布拉德利 · W. 卡罗尔和戴尔 · A. 奥斯特利合写的重量级教材《现代天体物理学引论》[47]一书。我们这里谈到的很多数据就出自这本书[47]。按照主序星的光谱特性可将其分为多个类别。由于历史原因,其命名并不是按照音序排列的。从高温到低温,分别是 O,B,A,F,G,K,M,L 和 T。如果无视最后两类,前面的类型可以用下面的助记顺口溜来总结:“Oh,Be A Fine Guy/Girl,Kiss Me.”(噢,做个乖小伙/好女孩,亲我一下。)这些分类中靠前的,是表面温度最高、亮度最大、质量最大的那些恒星,而后面是最暗淡、温度最低、个头最小的那些。L 和 T 属于褐矮星。它们发出的主要是红外线,其内部发生各种不同的聚变反应。我会忽略这两类恒星,尽管也有科幻小说描写过此类星系中的行星。

主序星的那些重点特征,是科幻小说家开始考虑故事中恒星特性的理想起点。(表 14.1 中的数据,以及此后讲解中出现的数据,均来自卡罗尔和奥斯特利合写的《现代天体物理学引论》一书[47]附录G。)

表 14.1 恒星属性与光学分类

| 类别 | $T$(K) | $L$(太阳=1) | $M$(太阳=1) | $\tau$($10^9$年) | $R$(太阳=1) |
|---|---|---|---|---|---|
| O5 | 42 000 | $5\times10^5$ | 60 | 0.0012 | 13 |
| B0 | 30 000 | 32 500 | 17.5 | 0.0054 | 7 |
| A0 | 9800 | 39.4 | 2.9 | 0.74 | 2 |
| F0 | 7300 | 5.21 | 1.6 | 3 | 1.4 |

① 主序为天文术语,指恒星的青壮年时期,恒星在主序上度过一生的大部分时间。

续表

| 类别 | T(K) | L(太阳=1) | M(太阳=1) | τ($10^9$年) | R(太阳=1) |
|---|---|---|---|---|---|
| G0 | 5940 | 1.25 | 1.05 | 8 | 1.1 |
| G2(太阳) | 5800 | 1 | 1 | 10 | 1 |
| K0 | 5150 | 0.552 | 0.79 | 14 | 0.93 |
| M0 | 3840 | 0.077 | 0.51 | 66 | 0.63 |
| M7 | 2860 | 0.0025 | 0.08 | 320 | 0.2 |

表 14.1 中的恒星亮度用 $L$ 表示(也就是恒星以光的形式放射能量的速度)，其度量单位是把太阳的亮度设为 1。$M$ 和 $R$ 是恒星的质量和半径，也是以太阳为标准单位。变量 $\tau$ 是主序寿命，也就是恒星青壮年时期的长度。在此期间，它不断燃烧核内的氢，直到没有更多的氢可用于聚变反应。每个表示大类的字母后跟着的数字表示下面的次级分类。对应数字越小，恒星温度就越高，亮度就越大。

对任何恒星而言，下面的公式都非常重要：

$$L=R^2\left(\frac{T}{5800}\right)^4 \tag{14.1}$$

这是使用公制计量单位计算黑体亮度的斯蒂芬-玻尔兹曼公式。我们也可以对其进行变形，用半径和亮度值作为自变量表示表面温度：

$$T = 5800\text{K} \times \left(\frac{L}{R^2}\right)^{1/4}$$

或者用温度和亮度计算半径：

$$R = \sqrt{L} \times \left(\frac{5800\text{K}}{T}\right)^2$$

恒星发出的光在光谱中的位置取决于其表面温度：其波长可以用前文中出现过的维恩位移定律计算得出。在这里可以写成下面的形式：

$$\lambda_p = 1\mu\text{m} \times \frac{2900}{T} \tag{14.2}$$

其中 $T$ 的单位为 K。这一公式的实用之外在于：最小的恒星表面温度恰好是 2900K，所以它所发出的大部分光，波长都属于红外线范围(也就是波长 1$\mu$m 左右，正巧在可见光的波长上限之上)。它所发出的可见光，波长大都在光谱中的红光区域，使恒星看上去显现为红色。而我们的太阳表面温度为 5800K 左右，大约正好是 2900K 的两倍，也就是太阳光的波长集中于 0.5$\mu$m 左右，正好在可见光范围的正中间。天空中最亮的恒星表面温度超过 29 000K，所以它们发出的光集中

在波长0.1μm或更短范围。它们发出的可见光多数都波长较短，使星星看上去呈蓝色或蓝白色。

下面的公式仅适用于主序星：

$$L \approx M^3 \tag{14.3}$$

上式的含义是，随着恒星质量的上升，其亮度会迅速增强，增幅与质量的三次方成正比。这条定律只是对现实情况的近似估计。对质量较轻的恒星来讲，幂指数相对较小；而对质量较大的恒星而言，幂指数相对较大。亮度的急剧增强在一定程度上可以解释大型恒星寿命较短的原因：恒星的主序寿命取决于它所拥有的燃料数量（其质量），以及它消耗这些燃料的速度（其亮度）：

$$\tau = 10^{10}\text{年} \times \frac{M}{L} \approx 10^{10}\text{年} \times M^{-2} \tag{14.4}$$

这也是个仅能反映近似值的公式。对质量非常小的恒星计算时，精确率尤其低。由此还可以得出另一条推论：对主序星而言，

$$R \approx M \tag{14.5}$$

这并非偶然。原因在恒星核心的温度没有达到$10^7$K之前，氘核聚变反应根本就不会开始[170]。

要把这些公式化为公制单位，只要记住一些数值就够了。例如太阳的发光功率是$3.84 \times 10^{26}$W，那么，

$$L_{\text{metric}} = 3.84 \times 10^{26}\,\text{W} \times L$$

类似地：

$$R_{\text{metric}} = 6.95 \times 10^{8}\,\text{m} \times R$$

以及

$$M_{\text{metric}} = 1.99 \times 10^{30}\,\text{kg} \times M$$

有了这些公式，我们就可以做到很多。特别地，地球出现生命的时间大约是在其形成之后7亿年。作一个大胆的猜想，我们暂且假设，宇宙中任何一颗类似地球的行星，要想出现生命都需要这么长的时间。这样一来，我们就只能选择主序寿命大于7亿年的恒星，O类和B类恒星肯定不满足要求了。A类也比较勉强。这样筛选之后，淘汰掉的恒星并不多：宇宙中个头较小、温度较低、亮度较暗、寿命较长的恒星，远远多于更大、更亮、更热的恒星。但这至少是一个起点。最小的M类恒星估计也不合乎要求。它们的质量太小，行星只能在非常靠近其自身的轨道上旋转。此时由于引潮力影响，它将无法自转，而只能是有一面长期朝向恒星，就像地球的卫星月亮总是只有一面对准我们地球那样。这会导致行星的一面

温度过高，而另一面又过于寒冷。

再给大家讲一个有趣的公式：假设行星离恒星的距离是 $d$ 天文单位，那么在行星上看到的恒星视角大小

$$\theta_s = 0.5^\circ \times \frac{R}{d}$$

而如果这颗行星还有卫星，那么卫星的视角大小是

$$\theta_m = 0.5^\circ \times \frac{R_m}{d_m}$$

其中的 $R_m$ 是该卫星的半径与月球半径（为 1737km）的比值。$d_m$ 是卫星与行星的平均距离与月球到地球距离（为 384 000km）的比值。开普勒第三定律告诉我们，在该行星表面上，一年的长短（也就是围绕其恒星旋转一周所需的时间）是

$$Y = \left(\frac{a^3}{M}\right)^{1/2} \tag{14.6}$$

其中 $Y$ 的单位是年。

## 14.3 行星与其恒星之间的距离

现在我们已经有了合适的恒星，该把住人的行星放在哪儿呢？碳基生命需要大气中的氧气和行星表面的液态水。如果行星过于靠近恒星，就会变得太热，表面的水分就会被蒸发殆尽；如果距离太远，水又会结冰。在整个太阳系，如果按这个标准进行选择，仅有 3 颗类地行星与太阳的距离合乎要求，它们是金星、地球和火星。

行星既能够从它所环绕的恒星那里获取能量，也可以通过自身辐射出能量。我们可以据此推算出行星表面的温度。在此过程中，需要考虑到以下这些因素：

(1) 恒星辐射出的能量朝向四面八方。恒星发出的光，向以它自身为中心的球面区域内辐射。假如一颗行星距离恒星的距离是 $r$，那么恒星的光会照射在一个表面积为 $4\pi r^2$ 的球面上。

(2) 由于行星本身成分不同，大气性质也不同，每颗行星都会吸收一部分来自恒星的光，而把其余部分反射出去。行星能够吸收的光与其面积成正比。

(3) 关键性的一点是：行星所吸收的光，必须与它辐射掉的能量（长期平均值）相等。如果不满足这个条件，行星的温度就难以保持稳定。行星温度的稳定，来自可持续的自我调节。如果它吸收的光大于辐射流失的能量，其温度就会不断上升，直到辐射与吸收光照持平；而如果它辐射掉的能量大于吸收到的光能量，其

温度就将降低，导致辐射量下降，直至与吸收到的光持平。

我们还必须定义一个名为“反照率”的数值。反照率是指未经行星吸收就直接被反射掉的光（在照射到行星表面的所有光中）所占的比率。地球的反照率大约为0.3，也就是说，来自太阳的光线大约有30%没有被地球表面吸收。这是海洋地区（吸热能力相对较强）和大陆与云层遮挡地区（反射能力更强）的平均值。其数值在不同地点、不同时间会有所不同。我们刚才得出的数字是各地长时期内的平均值——比如说几年的平均数。我还假设行星轨道为正圆形。有了上述定义之后，对没有大气层的行星而言，其表面温度：

$$T_0 = 278\text{K} \times \left(\frac{(1-a)L}{d^2}\right)^{1/4} \tag{14.7}$$

把上面讲述的内容总结起来，就是在恒星周围存在一个宜于生命繁衍的地带。非常笼统地说，其温度范围就是从273K（外缘），即水结冰的温度，到373K，即水汽化蒸发的温度（内缘）。这个区域并没有一刀切地明确距离界线，因为每颗行星的反照率都不同，而且大气对行星温度也有影响。这里有三个要点需要说明：

（1）大多数恒星的光照强度并不都与太阳接近。恒星亮度从太阳的$10^{-3}$倍到$10^6$倍不等，最大差别可以达到十亿倍以上。这也就是说，不同恒星周围的生命区间，到恒星的距离可能会有非常大的区别。

（2）我把前面公式算出的温度记作$T_0$，因为它是假设行星没有大气层时的温度。大气层在决定行星表面温度问题上有着非常重要的影响。本章晚些时候，我们会介绍一个简单的模型来反映大气层的影响。

（3）式（14.7）算出的仅仅是行星表面的平均温度。实际温度在不同的时间和行星表面的不同地点可能会大大不同。

我们可以重新完善计算模型，以便在给定了行星反照率和恒星亮度时，能够算出一个星系的生命区间内外界限。令$d_i$和$d_o$是可居住行星距离的下限和上限（依然忽略大气层影响），那么：

$$d_i = 0.55\sqrt{(1-a)L}$$

$$d_o = 1.03\sqrt{(1-a)L}$$

这次依然是非常粗略的划分。由于未考虑大气层的影响，我们按照以上两式计算时，发现地球居然也在可居住范围之外，可见这个模型还是过于简单。不过，终归还可以当作一个起点。

在我们太阳系的生命区间中，有潜力出现生命的星球仅有金星、地球和火星3颗。19世纪末，天文学家乔瓦尼·斯基亚帕雷利和珀西瓦尔·洛维尔曾经怀疑自

己发现了火星生命的迹象。因为他们在火星表面看到了复杂的“运河”系统。洛维尔觉得，这些运河应该是高度发达的文明留下的印迹。这个发现催生了无数的科幻作品，从 H. G. 威尔斯的《世界之战》，到罗伯特·海因莱因的《红色星球》、《异乡异客》[108,115,248]。但这个猜想也几乎立刻就遭到质疑。人们怀疑火星过于寒冷贫瘠，不可能支持如此发达的文明。诺贝尔化学奖获得者斯万特·阿仑尼乌斯就是最早查阅科研资料，断定火星不太可能存在生命的人物之一。他是对的，那些所谓的“运河”只是望远镜性能低下和观察者头晕眼花的产物而已。但是阿仑尼乌斯一手拿走的东西，却用另一只手送了回来。在他所著的《群星的宿命》(与琼斯·埃利亚斯·弗雷斯合著)中，他猜想金星的表面潮湿而且雾气弥漫，与侏罗纪时代的地球相似[25]。这个预言又催生了另外一批科幻小说，场景设定在金星，故事中有长得像恐龙一样的怪兽，在泥泞的土地上追杀人类。海因莱因的小说《火星人波特凯》可能算得上这类小说的鼻祖了。尽管 S. M. 斯特林先生也基于这一猜想写了一部平行宇宙系列小说。这类小说中的火星和金星，总是被奇特的外星生物占据。读起来的感觉很像伯勒斯的“巴松王国”系列小说[118,229]。

但到了 20 世纪 60 年代和 70 年代，真正的相关科学考察开始之后，这类作品就销声匿迹了。人们发射了无人探测器，飞越甚至登陆了火星和金星。它们毫无意外地发现火星只是一片沙漠，平均温度跟南极差不多。而金星更是像地狱一样火热，表面温度高达 750K，热到足以把铅熔化。金星温度与我们的简单模型存在的巨大差距，与它的大气层存在极大的关系。

## 14.4 温室效应

大气中的某些气体能够阻止红外线，而后者正是行星表面辐射热量的主要形式。此类气体中就有二氧化碳($CO_2$)。在地球大气中的含量是 0.000 38，而在金星大气中，却占到了惊人的 98%。另一种此类气体是甲烷，在地球大气中仅有极少量。但对我们最为重要的温室气体却是水蒸气，占到地球温室气体总量的 90%。

温室气体的作用原理非常简单：来自太阳的光照主要是可见光，地球大气对它们基本上是透明的，其中 70%都会到达地球表面。但是，地球辐射出来的光线却主要是红外线，它们大部分都被温室气体截留在地表附近。我们可以利用式(14.2)来帮助理解这一问题：由于地球表面的温度大约是 290K，所以地球辐射出来的光线波长集中在 10μm 左右，属于光谱中的红外区。这些光线被温室气体

大量吸收，很多还被重新辐射回地面。在安德森所说的“造星”活动中，我们必须设法把大气的影响考虑在内。计算行星温度的计算机软件，通常会把大气层纵向分成几个不同层。每层的红外线吸收能力不同。它们还把地面划分为不同区域，根据地形不同区别对待。不过，就算使用简单的模型，也可以看出一些端倪。

温室气体发挥作用的方式就像一条毯子，其作用是延缓行星表面的能量逃往宇宙空间的时间，因此导致了前文公式(14.7)无法反映出的温度上升。火星的大气层非常稀薄，比地球上最高的山顶上的空气还要稀薄。以至于温室气体只能把它表面的温度提高很小一点点。地球大气层略微偏厚一点，因此能够令表面温度上升30K。金星的大气层厚度惊人，主要成分是二氧化碳；它表面的温室效应已经完全失控，将其表面温度提升了500K以上。

让我们假设大气层可以看作仅有一层，无论是纵向还是横向，都不需要分层或者区别对待。那我们就可以用丹尼尔·J.雅各布的著作《气体化学》中的简单模型来计算温室气体为地球带来的升温效果了。[129]128~131 我们假设行星对可见光的反照率是 $a$，而整个大气层能够将比率为 $f$ 的地表红外辐射留住。利用这个模型，行星表面的温度即

$$T=278\text{K}\times\left(\frac{(1-a)L}{(1-f/2)d^2}\right)^{1/4} \tag{14.8}$$

随着 $f$ 数值的上升，$T$ 值也将增大：意思是温室气体留住的红外线越多，行星表面的温度就越高。不幸的是，我们这个简单的模型，其功用也非常有限。预测给定大气成分的 $f$ 值非常困难。对应于地球表面288K的平均气温，$f$ 值应该是0.77。人们创作关于外星球的科幻小说时，可以参照这些数据来展开情节。

大气层温度也可以用下面的模型计算：

$$T_{\text{atm}}=\frac{T}{\sqrt[4]{2}}=0.84T$$

对大气层相对稀薄的星球（比如地球）而言，单层大气模型基本够用。但要是遇见金星这样大气层特别厚，温室气体又特别多的星球，就只能运用多层次模型，才能得到更贴近现实的数据了。单层模型还忽略了空气对流与热量水平传导的影响，两者都是计算行星实际温度需要考虑的重要因素。

假定上面得到的反照率 $f$ 值不变，那么在距离太阳0.6～1.1AU的区间里，地球表面都可以保证水的冰点与沸点之间的温度。但这并不意味着真正的生命地带可以有这么宽。行星表面温度取决于大气成分，但大气成分反过来也会受到行星表面温度的影响。金星在很大程度上都是地球的姐妹星球，其质量约为地球

的85%，体积约为地球的90%，但它表面的状况却像传说中的地狱。多数天文学家认为，金星之所以变成现在的样子，就是因为陷入了恶性循环。最开始，金星只是比地球得到的光照多了一点，这导致行星表面释放出更多二氧化碳。这些二氧化碳导致温室效应加剧，温度上升，进而导致更多二氧化碳释放，如此循环往复[134]。而地球，由于离太阳的距离更远了大约0.3AU，就逃脱了这样的命运。

由于行星大气成分改变或恒星辐射量变化，宜居空间的范围也会发生变化。历史上，太阳的光照强度是不断上升的。太阳系形成初期，太阳的亮度只有当前的70%，而到10亿年以后，又将比现在亮10%[47]图11.1。根据上述数字，凯斯汀、魏特迈尔和雷诺兹计算后得出结论，认为在过去45亿年间，太阳系内适合地球生物存续的空间外缘，仅仅是从0.95AU扩张到了1.15AU[136]。

考虑到地面状况，金星曾经存在类地球生物的可能性极小，但火星就是另外一回事了。火星曾有过厚厚的大气层，尽管后来没能保留下来。非常有力的地质证据表明火星表面曾经存在大量液态水，时间很可能是数十亿年前。当时火星有较厚的大气层，表面温度也因此更高一些。至于火星的水现在到哪儿去了，人们众说纷纭。它们可能被困在行星表面的永久冻土之下。不过，火星的状况的确有可能曾经孕育出类地球生物，很可能是细菌级的类型。

近期出现的一些科幻小说也使用了这个猜想。最值得一提的是格雷格·贝尔①的长篇小说《移动火星》[33]。小说中，人们对火星进行地球化改造的努力，意外导致了火星古老生命形式的重生。这些生物在很久以前火星状况恶化的时候，进入了漫长的休眠期。

旨在探索太阳系外宜居行星的开普勒计划，目前已经开始发现有行星位于生命区间的证据。截至2011年12月，开普勒计划已经找到54颗处于生命地带的可选行星，其中编号为开普勒22-b的那一颗，可能与地球非常相像(其半径大约为地球的2.4倍)[1]。BBC网站上的报道，是简单的新闻通稿形式。在康奈尔大学预印本服务器上，可以看到一篇尚未发表的相关论文预印本[39]。作者非常明确地指出，他们无法断定这颗行星一定是个像地球一样的世界。其质量可能有地球的124倍之多，目前也完全不能断定它属于岩态/类地行星。但如果这真是一颗类地行星，科学家们估计其表面温度$T_0$(不考虑大气层温度)为262K，假设其反照率为0.29(与地球相同)，空气成分与地球相同，那么调整后的表面温度为295K。作者

---

① 格雷格·贝尔(Gregory Dale Bear，1951— )，美国科幻和主流文学作家。作品覆盖星际战争、人工智能、潜意识、加速进化等题材，至今已出版44部作品。近期有较多优秀作品被译成中文，如《血音乐》、《永世》等。

们表示，这些估测前提成立的可能性非常小。

## 14.5　轨道偏心率

生命区间呈球幔形，围绕在恒星周围。其边界线是模糊的。因为受到行星反照率和大气的影响。不幸的是，行星本身的轨道却不是正圆，而是具有轨道偏心率的椭圆。即便是行星到恒星的距离 $d$ 位于生命区间范围内，如果它的轨道偏心率过大，那么还会有相当长的时间，行星由于公转而处在生命区间之外。

让我们假设一颗行星，它到本星系恒星的平均距离为 $d$，而 $d$ 值正好在生命区间的正中。这个“平均距离”，实际上就是椭圆形轨道的半长轴。如果轨道偏心率是 $e$，那么行星的近星点与远星点距离分别为：

$$r_p = d(1-e) \tag{14.9}$$

$$r_a = d(1+e) \tag{14.10}$$

如果生命区间的宽度为 $\Delta z$，那么近星点与远星点之间的距离应该都在生命区间之内，也就是说：

$$r_a - r_p = 2ed \leqslant \Delta z$$

或记作

$$e \leqslant \frac{\Delta z}{zd} \tag{14.11}$$

地球的轨道偏心率仅有 0.0167，而它的 $\Delta z/d$ 数值为 0.2 左右，就是说偏心率完全处在上式设定的合理范围内：地球在公转轨道的任何位置，都完全处于生命区间之内。其他行星的偏心率有时较大，火星的偏心率是太阳系八大行星中最大的，达到了 0.0934。整体而言，太阳系行星的偏心率普遍不大。而系外行星有时则会有极大的轨道偏心率。这不禁让人好奇：我们太阳系在这方面到底算是主流还是另类？厄休拉·勒古恩小说《黑暗的左手》中，故事发生于冰冻的泽森星球。由于它距离恒星相对较远，轨道偏心率又比较大，这个世界在公转周期内的大多数时间都是冰天雪地[145]。这样一颗星球上能否诞生生命，这个不容易判断。反正在小说里，泽森星球的人类是从别处迁徙来的。

系外行星的相关数据表明，大多数系外行星的轨道偏心率都大于太阳系行星的偏心率。目前并不清楚是什么导致了它们如此“偏心”，也不知道反常的是不是我们。我估算的结果是大约有 10%的系外行星偏心率低于 0.1%。这项统计中没

有把热木星考虑在内。因为引潮力引起的摩擦降低了这类行星的偏心率。

## 14.6 行星大小与大气层保有能力

要让我们所了解的生命存续，除温度以外，另一个必要的前提就是大气。地球、金星与火星在这方面的对比特别有意思。火星大气层非常稀薄，而且主要是二氧化碳(占94%，其他各种气体均只有微量)；地球大气层厚度适中，74%为氮气，24%为氧气，微量气体占2%；金星大气层厚到了可怕的程度，几乎全部是二氧化碳。

过去，火星的大气层曾经更厚一些。[A]这肯定能让它表面的气温更高一点，可惜，这颗行星在随后的数十亿年里失去了它原来的大气层。行星失去大气层的原因可能有很多种。下面只是几种可能性：

- 热散失。室温及室温以上的气体分子，平均速度为每秒钟数百米，比地球大小的行星逃逸速度低一个数量级。但是，这速度只是一个平均值，有些分子的速度比其他分子快很多。在大气层顶端，分子之间的撞击很少出现且间歇时间较长，有些分子会突破行星逃逸速度，并消失在太空。这被称作“金斯逃逸”，命名来源于第一位描述此类现象的天体物理学家的姓名。此外还有些非热力学的逃逸机制，包括大气层上端发生的一些化学反应，也可能给反应物提供足够的能量，令其逃入太空。总体而言，较大行星的气体逃逸速度要比更小的行星慢。
- 天体撞击。现在是历史因素登场的时间。行星与较大天体的撞击(小行星或彗星)可能会将大量气体送入太空。火星大气层变薄，部分可能就是因为它靠近小行星带，在各个地质时代频繁受到小天体撞击。
- 太阳风。从恒星吹来的“风”，是带电粒子组成的物质流，它可能会剥去行星的大气层，对靠近恒星的小型行星威胁尤其大。这可能对火星大气产生过影响。更几乎肯定是水星可能有过的那点儿大气最终消失的原因。太阳系小行星带以内的所有行星大气层，其气体成分都是后来重新形成的。行星诞生之初的大气层，都已经被新生太阳的强烈太阳风吹散。
- 化学分离。气体中的成分可以以化合物形式被固定在行星表面。地球的在多数碳就是这样存在的。如果地壳中所有的碳都被释放到大气中，地球的温室气体效果可能比金星还要夸张。

大气形成的过程也同样复杂，很难详细讲解。它涉及火山活动、行星早期被

彗星碰撞的历史,以及(对地球而言)星球表面的生物活动(它们使得地球表面大气中有大量氧气存在)。

### 14.6.1 热力学散逸方式

分子摩尔质量为 $m$ g/mol 的气体,在温度为 $T$ 的环境下,其平均速度(rms)为

$$v_{rms}=157\text{m/s}\times\sqrt{\frac{T}{m}} \tag{14.12}$$

而行星逃逸速度的计算公式是

$$v_e=11\,000\text{m/s}\times\sqrt{M_p/R_p} \tag{14.13}$$

其中的 $M_p$ 是行星质量与地球质量相比的倍数,而 $R_p$ 是行星半径与地球半径相比的倍数。行星科学家使用的金斯逃逸机制引申出一条判定标准:如果某一类气体分子的平均速度大于行星逃逸速度的 1/6,那么在漫长的天体活动周期中,热散失机制就会导致这类分子从行星大气中渐渐消失[46]103。

表 14.2 列出了火星与地球的若干数据对比。其中的温度数值取自大气层顶端的常见温度。由于受臭氧层的影响,地球温度较高。因为臭氧可以吸收太阳光中的紫外线,因而能够给这个高度的空气加热。而火星则不具备类似的防护机制。

表 14.2 地球与火星的相对属性

| | 地 球 | 火 星 |
|---|---|---|
| 半径($R_p$) | 1 | 0.533 |
| 质量($M_p$) | 1 | 0.107 |
| 温度 | 1000 | 140 |
| 分子平均速度 | 11 000 | 4800 |
| 氢气平均速度 | 3500 | 1860 |
| 氦气(He) | 2480 | 930 |
| 氧气($O_2$) | 878 | 328 |

从表 14.2 中,我们还可以窥见另外一些细节:

(1) 由于其分子平均速度过快,氢气与氦气都不应该大量出现于这两个星球的大气层。

(2) 不过，仅考虑热散失因素的情况下，氧气在两颗星球都不应该消失。火星的逃逸速度虽然较慢，但表面温度也较低。因而在这方面，与地球的情况依然类似。

地球与火星相比，其大气中主要成分的平均分子速度与逃逸速度的比值全部都大致相当。因此，我们不能把两个星球大气成分的差异归因于热散失。

火星大气中没有氧气，是因为氧被固定在了火星土壤中，以 $Fe_2O_3$（铁锈）的形式存在。氧气的化学性质过于活跃，以至于除非有持续的氧气来源，化学反应都会将其固定为化合物形式。在地球上，氧气来源于生物的呼吸循环，也就是生命活动造成的结果。与此类似，火星表面之所以没有水，是因为紫外线会把水分解成氢气和氧气，然后氧气被化学反应固定于地面，而氢气散失在太空。这些过程展示了大气成分复杂的一面。火星的空气之所以比地球稀薄那么多，并不只是因为它的质量和体积，而取决于很多复杂的因素。

### 14.6.2 天体碰撞

地球大气层的总质量约为 $4\times10^{18}$kg。如果我们想让 1%的大气成分获得逃逸速度，需要提供的能量约为 $2.5\times10^{24}$J。彗星和小行星撞击地球时的速度，通常可以达到 30 000m/s，就是与地球公转的速度相当。要提供上面我们提到的能量，就需要 $5\times10^{15}$kg 撞击地球的天体，或者在假设其密度为 5000kg/m³ 的情况下，体积达到 $10^{12}$m³，相当于棱长 10km 的正方体。

这已经是地球能撞上的较大天体了，与导致恐龙灭绝的那颗彗星个头差不多。如此巨大规模的撞击，地球大约每隔一亿年才会经历一次。因此，至少在当前太阳系的环境下，我们可以忽略地球大气成分由于天体撞击发生变化的可能。这方面，火星与地球的对比很有意思。火星比地球更小，这意味着逃逸速度较低；它距离小行星带却更近，这意味着它遭遇天体撞击的可能性更大。两方面的因素都使火星大气更容易受到天体撞击的影响。

### 14.6.3 多大质量的星球适合生物繁衍？

根据我们前面讲过的内容，给具备维系生命能力的行星设置质量下限非常困难。如果火星有臭氧层会怎样？它会因此保留住它的水蒸气，因温室效应提高了表面温度？还是会因为大气分子速度达到接近地球的水平，而导致大气流失速度

更快？如果我们把火星放在地球轨道上，它又会不会因为较少受到天体撞击影响，而把它的大气层保留得更久一些？我猜想，火星应该接近于生命能够存续的行星质量和半径下限。因为整体看来，它的状况正好在能够产生生命的边缘。我这样的猜想姑妄言之，因为回答这个问题需要考虑到的因素实在太多，彼此间的关联盘根错节，很难得到确定无疑的答案。

那么，宜居星球的质量上限又在哪里呢？估计这个问题的难度，也跟前面那个差不多。其中一个上限，是当行星巨大到能够将较轻气体留在表面时，它有可能变成气态巨星。不过，气态巨星的形成不仅取决于行星质量，还跟它在恒星系统中的位置有关。太阳系的所有气态巨星，都位于火星轨道外的“冰冻线”之外。也许更重要的是：人们猜想，所有的气态巨星都有一个固体内核，其质量约等于地球的10倍。也许这些固体内核的质量，才是宜居星球的质量上限，但这同样无法确定。

## 14.7 安娜·卡列尼娜法则和宜居星球

*幸福的家庭总是相似的，而不幸的家庭各有各的不幸。*

*——列夫·托尔斯泰 《安娜·卡列尼娜》*

列夫·托尔斯泰小说名著《安娜·卡列尼娜》开篇第一句就是这样写的。而贾雷德·戴蒙[①]在《枪炮、细菌与钢铁》中据此引入了被他称为“安娜·卡列尼娜法则”的一条原理。当时他在考虑：地球上有那么多种类的动物，为什么只有少数几种成了人类的家畜？他发现，所有用来提供食物的家畜都有些共同的特征：它们都是食草动物，长得快，能够在圈养环境下繁殖，还有一些其他的共同之处。

引用戴蒙的说法：

> 要成为家畜，备选物种必须具备很多优良属性。缺少了任何一方面的先决条件，都会导致驯养失败，就像幸福的婚姻生活必需的那些条件一样。

正如他所说，“最重要的一点……成功实际上就是避免必定导致失败的诸多原因。”[65]157

前面我已经隆重推出了以自己名字命名的“阿德勒准则”：“所有的恒星基本

① 贾雷德·戴蒙(Jared M. Diamond,1937— ),美国科学家,因广受欢迎的科普作品而知名。

上都是一个样；而行星之间却可以千差万别。”现在讲到行星，我可以把前面的法则略微调整一下：

> 任何没有生命存在的行星都有它不同的特色；而所有能够支持地球式生物的行星，基本上都会是一个样子。

这实际上就是安娜·卡列尼娜法则在宜居星球问题上的推广：所有与地球类似的行星，都有一些突出的共同特征。最明显的就是它们都处于“生命地带”，离恒星的距离既不会太近，也没有太远。这一点就足以解决困扰科学界很久的一大难题：如果地球只是普通星系中围绕一颗普通恒星旋转的普通行星，没有任何特别之处，那为什么我们到现在都还没有发现宇宙中其他地方存在生命？宇宙中为什么不是到处生机勃勃？为什么没有外星人来找我们？

从 20 世纪 60 年代开始，由于行星科学研究的推进，两个观念渐渐发展成形：

(1) 不同行星间客观条件的差别，远远超出我们最初的想象。行星形成的过程非常混乱，而行星的历史(与其他很多因素一样)会对岩态行星的地理与气候状况产生深远的影响，程度超过任何人的预期。

(2) 行星要想出现类似于地球的生物形态，其前提条件远比人们在 20 世纪 60 年代想象的更为严苛。

这两个最新认识，肯定是大大减少了可能存在类地球生命的行星数量。尽管地球与其他行星相比，并不具有本质上的特异之处，但它的确又有些自己的特色，就好像一个宇宙彩票的中奖者，它就是碰巧具备了生命产生的一切条件。理解这个问题的关键是：尽管没有一个人可以说自己买彩票就一定能中奖；但与此同时，又总是存在买彩票中奖的人。

用德雷克方程一类的手段计算行星上存在生命的概率的可能性，本身没有任何意义，因为我们掌握的数据就是不够。迄今为止，我前面列举的这些宜居星球标准都较为可靠，不存在太多争议。但从下个小节开始，我会列出一些并不十分确定的甄别标准。

## 14.8 未解之谜

通过对火星轨道的众多模拟，人们已经发现了它的一个特异之处。地球气候的一大优点，就是可以在较长时期内保持稳定。部分原因在于地球自转轴总是大

致指向同一个方向，而不会出现过大的变化幅度。[8]由于火星轨道特别扁长，又缺少较大的卫星充当稳定器，所以火星自转的方向就可能出现较大的变化，而且在漫长的时间内都缺乏规律可循。人们相信，这对火星表面的季节变化会产生巨大影响[135,144]。目前还不清楚，稳定的自转轴向是不是行星产生生命的必要前提，但稳定的气候肯定是一个有利因素。假如果真是这样，拥有一颗较大的卫星，可能也是行星产生生命的必要条件。

另外一点，就是在所有已知行星中，地球还是唯一能确定具有板块构造的行星，这是它的体积和组成成分决定的（地球中心的辐射性衰变导致地壳始终具有一定的活动性）。有些科学家猜想，板块漂移对生命的产生会有帮助，因为它能确保植物和动物分布到更为广阔的空间，从而不容易被局部发生的灾难灭绝。谁知道呢？我还没见过有把板块漂移与生物进化有机结合在一起的科幻小说；我会很期待由此诞生的理论结果。

下一个话题：多数系外行星都被发现于高金属质的恒星周围，也就是说，它们所围绕的恒星，成分中的金属含量高于平均值。（对天文学家而言，任何不是氢又不是氦的元素都叫金属。）究其原因，可能是金属含量高的恒星星系，拥有更多能够产生行星的原材料，尽管其具体细节仍不清楚[100]。迄今发现拥有行星的系外恒星，约有一半的金属含量都高于太阳。真正有趣的是，这些金属含量高的恒星，通常都较为年轻（Ⅰ类居多），因为金属来自恒星中心的高阶原子聚变反应；最古老的那些恒星诞生时，这些金属类元素根本还不存在[130]495~497。由于原子序数较高的元素是通过超新星爆发的方式向宇宙空间发散，这种现象多出现于银河系中心，而在外侧旋臂中较为稀少。所以，银河系中心附近的恒星，可能有更多的行星。不过，频繁的超新星爆发及其造成的辐射，也可能会令过于靠近银河系中心附近的行星生命早早灭绝。因此，星系中也可能存在一个“星系生命空间”，生命只能在这个环形地带存续。它离星系中心既不能太近，也不能太远[100]。

轨道偏心率巨大的行星，可能会通过引力影响将类似地球的行星拉扯到生命区间之外。但是，星系外围的巨大行星，又可以给类地行星充当屏障，降低小行星撞击风险（就像导致恐龙灭绝那次一样的撞击事件）[247]。热木星被认为是形成于星系外围，但经过多个阶段的演化之后，迁移到了贴近恒星的轨道上；这个迁移过程，有可能对本星系其他行星的位置产生负面影响。所以，热木星存在的星系（占所有已知有行星星系的10%以上），可能就不会有生命存在。但木星这样寒冷的气态巨星出现在星系外围，又有可能是生命产生的必要前提条件。

此外还有很多需要考虑到的因素，几乎无穷无尽。尤其是当我们在生物前边

还要加上"智能"二字的时候。这个话题我们会在后文继续。任何想要进一步了解这一主题的读者，可以考虑布朗尼的《稀有地球》作为起点。不过，自从那本书2000年问世以来，这个领域也已经有很多新书出版[247]。

我们已经列举了能维系类地生命的行星的所有条件。在下一章里，我会开始讨论如何找到外星人的问题。

**注：**

A. 作为一位善于预言的作家——埃德加·赖斯·巴勒斯在《火星公主》一书中写道："火星平民建成了一座大气制造工厂，用来应对他们星球的大气流失问题。"不过，书中用来补充大气的方法（使用第九射线）却算不上非常科学。

B. 但丁·阿利吉耶在公元1300年就明白了这一点，尽管他的方式与我们有些区别。

# 第 15 章

# 寻找史波克的科学方法

且天地大也，其在虚空中不过一粟耳……虚空本也，天地犹果也，虚空国也，天地犹人也。一本所生，必非一果，一国所生，必非一人。谓天地之外无复天地焉，岂通论耶？

——［南宋］邓牧 《伯牙琴》

## 15.1 系外行星和外星植物

外星生命存在的猜想由来已久，至少从古希腊时代就已经众说纷纭。但是，用严谨的科学方法寻找外星人的工作，却是直到20世纪60年代才开始。那时候尽管有卡尔·萨根和菲利普·莫里森这样的知名学者参与，这一工作也没有得到足够的重视。相关项目总是得不到足够的资金支持，即便是对此最为狂热的科学家，也只能把它当作一份边缘性的研究。

20世纪90年代起，情况出现了较大转机。寻找外星人的研究不再处于从属地位，而是被推到了现代天文学的中心。现在，项目获得的资金支持已经增加了上百倍。这些变化背后的原因主要是技术方面的进步，而不是人们对外星人兴趣的增加。

寻找外星生命的活动最早开始于19世纪，当时的物理学家和化学家们认识到，生命本身也是一个物理化学反应过程，与自然界的其他事物之间并不存在本质性的区别。上一章我曾提到，美国天文学家珀西瓦尔·洛维尔声称看到了火

星表面的运河网络，并猜想这是先进的火星生命留下的印迹[155]第4章。洛维尔发表声明之后的20年，斯万特·阿仑尼乌斯与琼斯·埃利亚斯·弗雷斯合著的《群星的宿命》一书出版，书中谈到了洛维尔猜想的局限性。他们指出，用分光仪没有发现火星大气中存在水蒸气的迹象，它的表面也就不太可能存在液态水或水道[25]183。但这份质疑没能阻止一代又一代的科幻作家，从H. G. 威尔斯到埃德加·赖斯·巴勒斯，再到罗伯特·海因莱因和雷·布拉德伯里，都纷纷在作品中用到了火星生命走向衰亡的设定[40,43,108,118,248]。此处值得一提的是，阿仑尼乌斯在驳斥洛维尔猜想的过程中，使用了当时最为先进的观测手段——分光仪。科学的进步总是扎根于研究工具的改良，寻找外星人的工作尤其是这样。当然，新的技术和新的发现，经常会在回答旧问题的同时引发新的疑问："水手9号"探测器在很大程度上终结了火星存在高级生命的猜想，但也的确提供了新的证据，表明火星表面的气候状况曾经更适合生命存在（后来的火星车也发现了更多此类证据）。火星表面曾经更加温暖，而且有液态水在大地上流淌[163,193,208]。这些证据表明，火星可能不曾存在比人类古老的发达的生命形式，但更有可能存在过更加原始的生物，比如细菌或原始植物。

20世纪60年代的人们就已经确信，除地球以外，太阳系中的任何地方都不存在高级生命形式。所以，寻找外星人的努力就开始转向太阳系外的假想行星。但是，飞往外星系的能源代价过于高昂，而且根据已知的相对论世界体系，估计也会花费极其漫长的时间。所以，研究的重点变成了探知外星系生命的存在。朱塞佩·科科尼与菲利普·莫里森于1959年指出，射电望远镜能够发现10光年以外的外星文明发出的微波信号[60]。20世纪60年代的确成了射电望远镜发展最快的时期。就是在那时，射电望远镜探测到宇宙大爆炸时期留下的余热、脉冲星，及其他很多天文现象。事实上，1962年约瑟林·贝尔·伯纳尔最初探测到第一颗脉冲星发出同期性信号时，人们曾以为这就是外星人在向地球发信号。这个信号最早被命名为LGM—1，意思是"小绿人1号"。我把1959—1993年称为外星人探寻第一阶段(SET1)，因为这是寻找外星人活动的第一个繁荣期。我将用整个第16章①来详述接收外星人信号的话题。至于现在，我只想笼统地总结一下：人们进行过几轮寻找外星人联络信号的工作，最初由卡尔·萨根和弗兰克·德雷克组织，后来由斯蒂芬·斯皮尔伯格等人出资支持。但他们找了很久，却从来没有收到过外星人试图用无线电和微波联络我们的信号。

---

① 原文为第12章。

20 世纪 60 年代的人们缺乏必要的技术手段，不可能仅依靠光学望远镜发现系外行星。这是他们转而试图接收外星人无线信号的原因，这在当时是有可能发现外星人的唯一手段。但情况已经发生了变化。1993 年，地面光学望远镜首次发现了系外行星。从此以后，我们已经确认了 700 多颗系外行星的存在，另有 2000 多颗有待确认。太阳系的寥寥几颗行星，转眼就成了少数派。多数系外行星都是被太空观测设备发现的，最开始是哈勃太空望远镜，后来是开普勒计划启用的相关仪器。但也有很多其他的地面和太空观测设备为此作出了贡献。

就算有了现代技术支持，也很少能获得系外行星的直接图像。原因在于：恒星体积大、亮度高，而行星更小、更暗淡，离恒星又很近。如果恒星的距离为 $D$ 光年，而行星到恒星的距离是 $d$ 天文单位，那么从地球上看，它们之间的视角差就是

$$\theta = 3.26'' \times \frac{d}{D} \tag{15.1}$$

1 角秒(″)相当于 1°的 1/3600，大致与 50 座足球场之外的 25 美分硬币视角相当。现在的望远镜根本不可能达到那么高的分辨率：望远镜的最高分辨率取决于光的波长与望远镜直径。多数针对外星系的观测，使用的都是用于接收近红外线的设备，也就是波长为 1μm(即 $10^{-6}$ m)左右的可见光。如果 $A$ 是望远镜口径，$\lambda$ 是望远镜的工作波长。使用前文出现过的单位，这台望远镜能够区分的两物体间最小夹角，用瑞利分辨率公式可以计算得出：

$$\theta_{\text{best}} = 0.25'' \times \frac{\lambda(\mu\text{m})}{A(\text{m})} \tag{15.2}$$

根据这个公式，直径为 1m 的望远镜，如果工作波长为 0.5μm(正如在可见光波长范围的中央)，那么它可好可以分辨 26 光年距离上与恒星相距 1AU 的行星。地球表面的观测条件很少是理想的，大气扰动会大大降低望远镜分辨率，但太空中的望远镜可以在近似理想环境下工作。比如哈勃太空望远镜，在可见光范围(0.5μm)内的分辨率是 0.0403″，而在紫外线波段范围内的分辨率可以达到 0.026″[7]。

就算有了分辨率足够的望远镜，还是很难发现行星，因为它比自己所环绕的恒星暗淡很多倍。它可以反射一部分来自恒星的可见光，也可以发射出与自身温度对应的红外线，但发光量与恒星完全无法相比。行星在可见光与红外线波段的亮度，可以用以下公式计算：

$$L_{p,V} = aL \times \left(\frac{r}{2d}\right)^2 \tag{15.3}$$

以及

$$L_{p,I}=(1-a)L\times\left(\frac{r}{2d}\right)^2 \tag{15.4}$$

其中的 $V$ 和 $I$ 分别代表可见光与红外线；$L$ 是恒星的亮度；$a$ 是行星对于可见光的反照率；$d$ 还是和前面一样，是指行星到恒星之间的距离。$r$ 是行星半径。只要保持前后一致，$d$ 和 $r$ 可以选用任何计量单位。

比如，地球的半径为 6500km，到太阳的距离是 1AU，或者说 $1.5\times10^8$ km。由此可知，它的视亮度仅有太阳的 $1.4\times10^{-10}$ 倍，而红外亮度仅相当于太阳的 $3.4\times10^{-10}$ 倍。[A] 尽管有这么多的困难，人们还是找到了一些聪明的窍门，利用太空和地面望远镜获得了一些系外行星的直接图像。人类获得图像的第一颗行星围绕着亮星北落师门（南鱼座 $\alpha$ 星）旋转，这颗行星被命名为南鱼座 $\alpha$ 星—b，于 2008 年被发现。质量约为木星的 3 倍，其公转轨道距离恒星 115AU[5]。

直接成像的最佳对象是距离其恒星较远的巨大行星。由于在这么远的距离之外很难看清那么小的天体，所以在 700 多颗已经得到确认的系外行星以及 2000 多个待确认行星中，只有 29 颗是通过直接成像发现的[4]。多数太阳系外恒星都是用间接方法被发现的。目前主要有两种间接发现行星的方法：多普勒摆动①和凌日法。两种方法背后的物理学都很有意思，所以我们打算都来详细讲解一番。

## 15.2 多普勒方法

在前面的章节，我们已经提到过开普勒行星运动定律，讲到行星在万有引力作用下，沿着椭圆轨道绕恒星转动。根据牛顿第三定律，这还不是问题的全部：对应任何一个作用力，都有一个大小相等、方向相反的反作用力。恒星本身也会受到行星万有引力的影响。事实上，并不是行星围绕着恒星旋转，而是恒星与行星一起绕着共同的质量中心旋转（质心位置与恒星非常接近）。行星的轨道范围很大，行星沿轨道高速运行；而恒星轨道相对短小，环绕共同质量中心旋转速度较慢。但是，恒星的运动是可以测量的。

假设有一颗质量为 $M$ 的恒星，它有一颗质量为 $m$ 的行星，到恒星的距离为 $d$。

---

① 也称为摆动方法、视向速度法。

为简便起见，我们只考虑圆周运动。如果恒星转速为 $V$，而行星速度为 $v$，由动量守恒定律可知：

$$MV = mv \tag{15.5}$$

或者

$$v = \frac{M}{m}V$$

由于 $m$ 比 $M$ 小很多，行星的速度也会大大超过恒星速度。举例说明：木星是我们星系最大的行星，它的质量是地球的 318 倍，但也仅有太阳质量的 1/1000。因为它的公转速度是 13km/s，太阳围绕同一质心的速度，就将只有 13m/s。而木星对太阳转速的影响，大大超过了太阳系的其他行星。

多普勒定律可以为我们提供两个方面的重要信息：

(1) 恒星围绕星系质量中心旋转的速度；

(2) 行星围绕恒星的公转周期。此处的要点是利用多普勒效应，我们可以知道恒星是在向我们靠近还是逐渐远离。行星围绕恒星公转的同时，恒星会有一段时间向我们靠近，一段时间逐渐远离。恒星运动的周期就是行星的公转周期。

利用这些信息，我们还可以计算出行星围绕恒星公转的速度、它与恒星的距离，以及行星的质量，下面是具体的计算方法。

如果 $Y$ 是行星公转周期(以年为单位)，$d$ 是行星到恒星的平均距离(以天文单位为单位)，$M$ 是恒星的质量(以太阳质量为单位)，那么开普勒第三定律告诉我们

$$\frac{d^3}{Y^2} = M \tag{15.6}$$

但上式中的 $M$ 为已知，因为(对主序星而言)光谱与恒星质量存在较强的关联(上一章已经讲过)，而恒星的光谱特征较容易测定。行星围绕其恒星公转的速度可以通过下列算式得出：

$$v = 30\text{km/s} \times \sqrt{\frac{M}{d}} \tag{15.7}$$

上式也可以写成

$$v = 30\text{km/s} \times \frac{d}{Y}$$

所以，在 $M$ 和 $Y$ 已经测定的情况下，就可以算出行星到恒星的距离 $d$：

$$d=(MY^2)^{1/3} \tag{15.8}$$

我们还可能算出 $v$

$$v=30\text{m/s}\times\frac{d}{Y}=30\text{km/s}\times\left(\frac{M}{Y}\right)^{1/3} \tag{15.9}$$

从 $v$ 导出 $V$，然后就可以算出行星质量了。因为木星质量正巧是太阳的 1/1000，而 1000m＝1km。我们就可以用木星的质量作为单位，写出计算系外行星质量的简单公式。

$$m(m_J)=M(M_s)\times\frac{V(\text{m/s})}{v(\text{km/s})} \tag{15.10}$$

为清楚起见，再次重申，上式中以木星质量为单位表示系外行星质量；以太阳质量为单位表示恒星质量；以 km/s 为单位表示行星速度；以 m/s 为单位表示恒星速度。

事实上，这种方法只能求出行星质量的下限。利用多普勒效应可以测量的只有恒星靠近或者远离观察者的运动，但天体运行的轨道实际上可以与望远镜方向成任何角度。因此，我们真正测量到的是 $m\times\sin i$，其中的 $i$ 是轨道倾角。$i=90°$，表示轨道面与望远镜观测面平行；$i=0°$表示我们的观测面与轨道面垂直。

## 15.3 凌日现象与开普勒计划

另一个常用的发现系外行星的方法是借助凌日现象。如果行星轨道倾角大约是 90°，那么在地球上的望远镜看来，行星就将从恒星正前方掠过。当行星掠过恒星时，它的亮度会微微减弱，减弱的幅度是

$$f=\left(\frac{r}{R}\right)^2 \tag{15.11}$$

其中的 $r$ 是行星半径，而 $R$ 是恒星半径。由于地球半径仅有太阳的 1/100，外星人如果想要靠凌日方法发现地球，就需要有能力测量 1/10 000 的太阳亮度变化。而木星的半径足有太阳的 10%，所以只要能测到 1/100 的太阳变化，就亮度能察觉到木星存在了。这依然不是什么理想的好办法，不过与 $10^{-11}$ 的直接成像精度要求相比，还是要容易得多。利用这种方法，可以观测到 3 种数据：

(1) 行星半径。可以根据亮度减弱幅度来计算；

(2) 行星公转周期。每次凌日，恒星光线都会变暗，所以只要观察足够长的时

间，就可以算出行星公转周期；

(3) 轨道倾角。可以根据凌日现象的出现频率和行星大小来计算。

虽然还不能直接得到质量，但是假如你已经用多普勒方法得到了质量，你就可以粗略地获知行星主要成分。因为知道了质量、体积，就已经可以算出平均密度。开普勒计划配备了专用太空望远镜，用于寻找此类凌日现象。它们找到了2000多个可能是行星的对象，其中74个最终确认为行星。

多普勒摆动与凌日方法，都适合观测体积较大、距离恒星较近的行星。因此，我们到目前为止发现的行星，往往都与木星相当，甚至更大。而且普遍较为靠近恒星。但是，截至2011年，开普勒计划就已经发现了几颗与地球大小相当的行星，还有一个所谓的“超级地球”，后者处于所在星系的生命地带[6]。

## 15.4 生命的特殊印记

一旦找到了生命区间内的星球，我们就能在很多光年以外发现上面有生命存在吗？问题取决于我们能否在凌日过程中测知其大气成分，这是难度极大的任务。比如地球的大气层，就仅仅延伸到地面以上100km。如果地球收缩到仅有篮球那么小，那么大气层的厚度就相当于仅有0.1in。大气层多数是透明的，恒星的光芒因为大气层存在而发生的变化，要比凌日导致的变化小很多倍，而凌日导致的变化幅度本身就已经很小。但是，人们还真发现了大气导致的光谱变化。2002年，大卫·夏博诺带领的研究团队在围绕恒星HD 209458的一颗行星中发现了钠存在的迹象。这颗行星半径大约是木星半径的1.35倍。因大气层存在导致的光谱变化，大约只有1/5000[49]。

从那时起，天文学家先后发现了十几颗系外星球的大气成分[213]。凌日观测法对研究热木星大气成分最为有用。因为它们体积较大、距离恒星较近，因而能够得到的信号较强，凌日现象出现的频率也较高。在这些行星的大气成分中，水蒸气、一氧化碳、二氧化碳和甲烷都曾被发现。截至当前，还没有发现任何类地行星和超级地球的大气成分，但这应该只是时间问题了。人们希望能够在生命区间内的星球大气中探测到氧气或者臭氧的存在。因为氧气非常活跃，大气中含有氧气几乎可以算作是星球上有生命存在的确凿证据。近期研究表明，如果外星空间存在这两种大气成分，应该都可以探测出来[214]。不过，还有一些其他的生命存在

迹象，有些我们会在下一部分提到。

## 15.5 外星光合作用

大卫·戈罗德的《赤拓战争》系列，是有史以来描写外星人入侵视角最有趣的作品之一。小说中，外星人并没有使用直接炫耀科技实力的方法，而是对地球生态系统来了一场大换血，不断向地球输入新的动物和植物物种，一个比一个可怕。赤拓星的统治物种，很可能是一种大型蠕虫式生物，身上有一层紫橙色“毛皮”，它们见什么吃什么。除了戈罗德总喜欢不断拓展情节的毛病之外，这套小说可以说是非常吸引人，而且充分展示了科幻创作作为高智商活动的魅力（大卫，如果你在读这本书的话，请务必在有生之年完成这个系列！）。这套书的优点之一，是人类完全不知道外星人背后还有没有更高级的智能实体出现，又或者，这些外星生命的入侵会不会只是出于本能，根本没有什么严谨的逻辑可言。

有一点我不同意戈罗德的处理方式：在系列第一部《人类的抉择》中，主人翁吉姆·麦卡锡用几个抓获的赤拓星人做实验，发现它们对红光比其他可见光波段更敏感：

> “重要的是，它们星球的大气层较厚，而恒星却比较暗淡，我只是不清楚能到何种程度……哦，不过我可以告诉你它们恒星的颜色。”
>
> “是嘛？”杰瑞吃惊地张大嘴巴，“你怎么做到的？”
>
> “我可是一直都在忙这个……那颗恒星是暗红色。还想知道什么？”
>
> 杰瑞想了一想，满脸的凝重。“这一定是颗相当老的恒星。我现在明白赤拓星人为什么要找新家了，它们原来的家正在走向毁灭。”

后面，这条证据被再度启用，用来佐证赤拓星人的生态系统可能比地球更先进五亿年的时间，因为它们的恒星都已经进入老年[92]211。我想在此对杰瑞和吉姆的推导提出异议：他们两个隐含的意思，是说赤拓星人的恒星原本也和我们的太阳一样是一颗主序星，但因为历史太悠久，已经过完了主序寿命而变成了一颗红巨星。但是，他们的推导是毫无道理的。如果我们的太阳走完了作为主序星的历程，很可能会在蜕变过程中灭绝掉整个地球上的所有生命。赤拓星人要想存活，就只能抢在这之前很久离开家乡。事实上，地球上的生命最多也就还能延续十亿年，到时候不断增强的阳光就会使地球温室效应失控到像金星一样的程度。这时

候，离太阳的主序寿命结束还有很长时间呢[136]。

更有可能的情况是，赤拓星人的家园围绕一颗M级主序星旋转，这种恒星很常见，它们发出的光主要就是红光和红外线，而且寿命非常地长。也就是说，这种星系的居民，更可能拥有远远超过地球的悠久历史。这套书中的另一个有趣的细节，就是赤拓星的植物，比如说"红葛"，完全是红色的，可谓名副其实。这就引出了一个疑问：外星植物到底应该是什么颜色？

地球上的植物以绿色为主。因为它能够主要吸收红色（含有很多光子）和蓝色（有很高能量）光，而把波长适中的绿色光大部分反射回去，所以它呈现为绿色。不过，光合作用的化学与物理学机制非常复杂，每次反应中至少会涉及8个光子[245]。N. Y. 蒋和她在NASA的同事们一直在研究两个彼此相关的问题：为什么地球植物进化成了现在的光学吸收性质，以及围绕另外一颗行星运行的其他星球上的植物，会是怎样的面貌[138,139]。蒋还在《科学美国人》杂志刊登了这两篇论文较为简易的版本[137]。我们来引用后者中的一段话：

> M类恒星的温度范围，会使外星植物呈现出多种不同的颜色。一颗围绕静止的M类恒星公转的行星，其得到的能量大约是地球从太阳得到能量的1/2。尽管这已经足够生物体开花结果（比地球上的喜阴植物得到的能量多60倍以上），但其中多数光子都处于近红外区。为充分吸收各波段的光线（包括红外线），自然界可能会进化出各种不同的光合作用色素。由于极少光线被反射，在我们眼里，有些外星植物甚至可能是黑色的[137]。

那么"红葛"是可能出现的了，但黑葛出现的几率可能更高。M类恒星系统中的植物可能面临的一大威胁，是这类恒星有时出现紫外线爆发，这可能会让生命难以在陆地立足，而只能出现于水面9m以下。

蒋和她的同事们还考虑了F类和K类恒星周边行星上植物的生存方式。对F类恒星而言，专家们的结论是：它们可能主要是蓝色调的。这可能是星球有生物存在的另一个证据，其反射光谱可能存在一个"峰值"，由光合作用反射光线的主色调决定。他们的结论是：有可能，但未确定，这种植物的光谱特征能在远距离之外被探测到。不过，至少她的论文给科幻作者们提供了可以琢磨的全新素材[139]。

目前寻找外星生物的重点在植物身上，其原因也很简单：我们不需要它们发出信号，就能测定它们的存在。等着外星人登门拜访总是有失败的风险，而且总是基于一些很多人认为不够科学的假设。而且，外星存在植物的可能性，取决于

很多人们已经充分了解的科学法则。这也是当前的外星生物搜寻计划能够得到比 40 年前更多经费的原因——就是因为更容易获得成功。不过，找到外星植物或细菌带来的刺激，跟找到外星人（可以跟你聊天的）完全无法相比。这个问题，我们留到下章再继续。

**注：**

A. 这里有一个复杂之处：相对而言，这种恒星在红外波段的实际亮度，与太阳在对应波段的亮度相比，会比我们列出的数字更高。因为太阳的大多数光线都是可见光，而在波长 10$\mu$m 左右的光谱上，太阳是相当暗淡的。地球发出的光，反而主要在这个波段。

# 第 16 章

# 与外星人对话的数学原理

## 16.1 对外星生命的三种观点

除了星际旅行，与外星文明或外星生命的接触就是科幻小说中最重要的主题。本章我们将探讨与外星人交流的问题。当然，想跟任何外星种族对话，都需要跨越很多障碍。首先，就是根本不知道这个世界上有没有外星人。科幻作者被分为三个不同的阵营。

(1) 外星生命在宇宙各地随处可见；

(2) 外星生命稀少，但外星智能生物存在；

(3) 根本就没有外星生物。

让我们逐个研究上述三种立场。

### 16.1.1 外星生命随处可见

从 20 世纪早期直到 20 世纪 80 年代，外星生命随处可见的观点可以说是科幻小说中最为常见的立场。在流行文化领域，20 世纪 60 年代的电视系列剧《星际迷航》让这一观点深入人心。剧中几乎每周都会展现一种新的外星文化和文明体系。其中的瓦肯星人、克林贡星人和罗慕兰星人更是频繁出镜。这个系列中每一个剧情分支都有新的外星人，以至于到现在已经有几百个外星人种出现于《星际迷航》的宇宙体系中。在一定程度上，这是因为电视系列剧的编剧也是著名的科幻

作家，包括诺曼·斯宾拉德、西奥多·斯特吉恩和大卫·戈罗德，后者正是从这里开始了自己的科幻写作生涯。拉里·尼文为短命的动画系列写过一集剧本，并从自己的《已知空间》系列中引入了晋提人这个外星种族。

电视上的科幻剧，往往会出现跟风现象。电视剧《巴比伦五号》的格调和风格都跟《星际迷航》格格不入，它的故事发生于一座拥挤的宇宙空间站中，里面有几十个星际旅行人种的代表。这种格局在科幻电影中也非常常见，比如大热的《星球大战》系列。近几年的电影《阿凡达》，也至少是隐性接受了外星人随处可见的结论，因为就在距离我们最近的星系，在一颗气态巨星的卫星上就有智能生物存在。

从我自己的立场看，科幻电影与电视剧中的世界观，通常要比科幻长短篇小说落后 20 年。宇宙中到处挤满外星人的设定，在科幻小说中的繁荣期是 20 世纪 80 年代。而且，与外星人的接触，也是科幻小说中随处可见的主题。威廉·吉布森的小说《蒙娜丽莎超速挡》，就稍微涉及了一些接触半人马座 α 星人的情节。尽管这与核心情结并无关联，整个故事完全可以在去除外星元素之后重写，而且很容易[96]。[A] 有很多的科幻故事，外星人只是作为背景存在。但对核心情节并无重要影响，阿西莫夫的很多小说都是这种类型。这种使用外星人概念的方式，似乎只是为了标明自己的科幻小说身份，而不是做出任何实质性的贡献。不过，我这样的说法已经接近于文学批评的性质，而我已经承诺过不往这个方向发展。

在文学作品中，拉里·尼文的《已知空间》系列，是外星人无处不在流派的杰出代表。尼文发明了很多彼此不同，又极富吸引力的外星种族：从类人生物（晋提人和派克星人），到准哺乳动物（皮尔森星的傀儡师），到非人类生物（座生且具有远程操控能力的戈洛格人，以及其他非常奇异的外来者）。不过，这些创意在其他作品中也很常见。比如罗伯特·海因莱因的青少年科幻小说《穿上宇航服上太空》中，故事的一开头就出现了两种外星人（母性星球和试图侵略地球的外星物种），到故事最后，更是把人类送上了被告席，由几千个外星智能种族对我们进行审判[114]。结束这个主题的讨论之前，我不能不提及奥拉夫·斯塔普尔顿的经典之作《造星主》[225]。这是英语科幻界最杰出的语言大师留下的一部经典作品，其中写到的外星种族丰富而且各具特色，包括节肢动物式的生命、形态接近于智能船舶的种族、有智力的植物等。其中的科学原理已经过时，但依然堪称有史以来最伟大的科幻作品之一。

“拥挤宇宙”的设想源自于“中庸原理”，也被称为哥白尼法则。其主要内容是：我们的行星普普通通，围绕的恒星普普通通，所在星系也普普通通（或许，连我

们的宇宙都普普通通……)。基于我们对天文学、物理学和化学的了解,这样的理解是对的,尤其是在我们发现了其他恒星周围还有 700 多颗其他行星之后。但是,宇宙中的"全面静默"在过去 20 年来,却让人们对哥白尼法则产生了怀疑。恩里克・费米可能是第一个提出质疑的人:如果我们的星系中有很多外星种族,他们很可能已经发展了数十亿年之久。但是,假如有些种族有能力开展星际旅行,哪怕只是加速到光速的几分之一,他们也只要花费几百万年就能走遍整个银河系。那么,为什么这些种族还没有来拜访过人类呢?如果星际旅行是不可能的,外星种族也至少可以通过无线电信号尝试与我们建立联络,为什么它们还没有发来信息呢[132]?人类寻找外星人的计划(SETI)也已经通过各种方式开展了 50 年,但宇宙之中的静默还是从来不曾被打破。

### 16.1.2　外星生命稀少但实际存在,只等我们去发现

也许宇宙间并没有数以亿万计的外星文明;也许外星种族总共只有那么一两个。持这类立场的科幻小说,最好的例子就是拉里・尼文和杰里・波奈尔的《上帝眼中的微尘》,书中描写了人类与"微尘星人"最初的接触。这种与人类接近的外星生物,由于人口规模失控,处在几乎永久性的战争之中。人类进入太空时代之后,花了上千年的时间才找到这些"微尘星人",与人类使用的"超空间"推进器的性能有关。(推进器由加州理工学院的丹・埃尔德森根据作者们的要求设计)[186]。

世上很少有只存在一种外星种族的科幻小说。因为在设想外星人的问题上,只要你能完成第一个,后面想要再编出多少都很容易,想要几个就能有几个。

### 16.1.3　我们就是很孤独

外星人缺席的早期科幻名著中,阿西莫夫著名的《基地》系列三部曲是杰出的代表。故事集中描写了"银河帝国"的衰亡与重生。后来,阿西莫夫自己也觉得这样几部小说里没有外星人登场很奇怪,于是在把自己的机器人小说与基地故事整合的过程中,特地写了很长的文字来解释,为什么银河帝国不曾出现人类以外的外星智能生物。

不过,人类是宇宙中唯一智能生物的观点已经开始被越来越多的人接受,他

们就算还没有成为多数，也已经是势力较强的少数派了。自从20世纪80年代以来，甚至已经在科幻作家群体中占到了一定的优势。流行文化再次对此做出了反映。直到最后一集之前，重映的《太空堡垒卡拉狄加》中都没有出现过任何外星物种。故事的主线是人类与希伦人的互动，而后者可以看作是人类自己创造出来的外星物种。

这种观点上的渐变来自于一个悖论。尽管科学家们普遍接受哥白尼法则，也知道作为生命潜在载体的行星在宇宙中非常普遍。但他们同时也了解到：行星表面的条件可以千差万别，而能够产生生命的环境要求可能非常严苛。在此之后，还有让原始生命进化为智能生物，学会星际航行，或至少是无线电通信的考验。多数物理学家和天文学家都倾向于认为，一旦行星上开始出现生命，出现能够进行星际通信的物种几乎是不可避免的结果[239]。其论据是：既然生物进化基于突变，并会保留最适合生存延续的特征，而（由人类历史可以看出）智力的发展与工具的使用对物种生存有很大帮助。那么，只要有足够的时间和适者生存的进化机制，智能生物的出现几乎是不可避免的。

研究进化论的生物学家却不这么认为，他们指出，人类的进化历程要求好几个小概率事件相继出现。例如，假设6500万年前的那颗彗星没有砸到尤卡塔半岛，导致恐龙灭绝，哺乳动物就不太可能主宰我们这颗星球。

## 16.2 与外星人接触的动力

如果外星人的确存在，第二个需要跨越的障碍就是找到一个让他们愿意跟我们接触的理由。其实，物种之间有很好的理由互不接触：《星际迷航》中的首要法则（不干涉外星文明进展），就是科幻小说中的很好范例。地球历史上，先进文明与落后文明之间的接触带来的腥风血雨，也给星际接触敲响了警钟。也许，外星人之所以躲避人类，就是因为不愿意伤害我们。斯坦尼斯拉夫·莱姆就展示了此类接触的可能风险[149]。由于宇宙间巨大的时空差距，现今的文明可能领先我们数百万年乃至数十亿年。他们向我们发出的任何启示，我们都可能无法理解，就像现代地球人很难向腓尼基人传授量子物理知识；或者，有些信息可能带来巨大的损害，比如将核弹设计图带到1939年的欧洲。不过，我们假设外星人真的跑来跟人类建立接触，他们的动机可能会有哪些呢？下面是一些可能的原因。

### 16.2.1　向我们开战

宇航员们想当然地以为，我们和小绿怪应该会友好地互致问候，然后坐下来谈些有趣的话题。不过这次，我们人类在地球上经历再次提供了有用的警示。我们人类已经在地球发现了两种智能发达，但与人类存在差距的生物，一种是普通猩猩，另一种是俾格米猩猩。那么我们是跟它们友好对话了吗？当然没有。我们人类射杀它们、肢解它们、砍掉它们的头作为战利品，把它们装进笼子里展览，给它们注射艾滋病病毒做医学实验，毁掉它们赖以为生的家园……如果在能够监听到无线信号的距离内真的有外星人，那么我们务必要关闭自己的发信装置，尽可能不要被他们发现。否则我们就完了。

——贾雷德·戴蒙　《第三种猩猩》[61]214,215

与外星人开展的设想，早在威尔斯 1898 年的作品《世界之战》中就已经露出了雏形。上面摘选的贾雷德·戴蒙作品片段，已经足以暗示这部作品中的外星人印象：它们是一群太空吸血鬼，通过吸食人的血液并直接注入自身血管来维持生命。它们要征服地球，因为火星已经开始变得不再适合生物居住（出于珀西瓦尔·洛维尔设想的原因）。作为一名坚定的社会主义者，威尔斯用欧洲殖民者在美洲和非洲大陆上的暴行作为自己笔下的火星人原型。这部小说引来了众多跟风作品，尤其是在电影和电视领域。这部小说曾经多次被搬上银幕。1938 年，还被奥森·威尔斯改编成著名的广播剧，更是启发了《外太空 9 号》和《独立日》等一系列类似作品。这样的主题在科幻小说界，反而不像在影视界那样受欢迎，一方面是考虑到星际旅行的巨大困难；一方面是科幻作者们倾向于认为，高级文明应该已经超越了需要发动战争的阶段（这设想也许是错误的）。

自高自大地把人类想象成行星空间乃至星际空间中侵略者的设定，相对较为少见。最近的《阿凡达》几乎是科幻作品中人类充当侵略者的孤例。20 世纪 30 年代出版的几本奥拉夫·斯塔普尔顿的作品，曾经尝试过此类设定。尤其是《最后的人和最初的人》一书中，写到人类灭绝了金星上一个古老水下种族的故事。战争的缘起是月球轨道越来越低，最终撞到地球，而使得地球无法继续供人类居住[225]。尽管这在科学上并不严谨，但故事中却很好地捕捉到了“第五类人群”的心理细节，他们被指定执行种族灭绝任务。当人类为了自己的生存，要毁灭一个更古老的种族时，对自身行为正义与否的纠结让他们经历过激烈的争论。斯塔普

尔顿深入刻画了在此过程中人类内心经历的狂喜与绝望。对道德议题的高度关注，使他成为科幻领域空前绝后的独特人物，直到现在，其作品仍有着不可取代的阅读价值。在小说《怪人约翰》中，同样的观点又以另外一种面貌在作品中浮现。他描写了一些超越人类的生命形式在普通人群中生活的细节。这一次，主角面临的困惑是要不要毁灭正常的人类物种，以确保更高级的生命形式存活。

我们必然需要回答的一个问题，就是星际战争是否可能发生。答案也很简单，如果星级旅行有可能实现，星际战争就有可能发生。能源将决定此类战争的成败。我们假设外星生命制造的飞船，能够达到光速的 86%，之所以选择这个数字，是因为这个速度上的相对论伽马系数是 2，也就是说，此速度下的动能与静质能量 $Mc^2$ 相等。我们习惯使用的 10 000kg 宇宙飞船动能为 $9\times10^{20}$ J，能量规模相当于 200 000 颗氢弹。另外几个说明此数字大小的参考数据是：

(1) 美国每年的能源消耗规模为 $9\times10^{19}$ J。换言之，飞船的动量大约相当于全美国 10 年的能源使用量。

(2) 多数撞击地球的小行星速度都是 30km/s，所以，如果飞船以这么高的速度撞击地球，其能量规模与 200 000 000kg 的彗星撞击地球相当。这还达不到灭绝恐龙的那颗小行星的数量级，但跟 1908 年撞击通古斯的小行星相比，已经大了很多。

(3) 在前面有一章里，我们已经知道，开动这么大一艘宇宙飞船的发动机，将会给地球带来大量伽马射线，总能量与地球获得的太阳光相当，这可能会导致整个星球范围的生物灭绝。

最后一条很有趣，它表明星际旅行飞船的发动机本身就是一件极为强悍的武器。我最早看到这样的观念，是在拉里·尼文的《已经空间短篇故事集》中的《武士》一篇。其中提到，一艘人类宇宙飞船用激光动力发动机杀死了一名晋提人（本质上，这就是第 9 章提到的光子发动机）[181]。其实你根本不需要发动机放射激光，任何能够进行星际航行的宇宙飞船，其发动机都是一件大规模杀伤性武器。物理学定律就决定了，它有能力对行星生命造成重创。这也让《阿凡达》中的一个桥段显得无比荒谬：电影末尾，胜利的纳威人把地球人赶回他们来时使用的飞船，命令他们回地球。不过，他们根本没有任何办法解除这样一艘飞船的武装。它的速度能够达到光速的 2/3，而且质量也远远超过 10 000kg。地球人只要打开发动机，就足以让整个潘多拉星球变得不再适合生物居住。其实纳威人还真应该把地球人杀光光，杰克·苏里应该很清楚他计划中的漏洞。

任何星舰的发动机都是强大的武器，可以造成巨大的破坏，有能力让一个星

球变得毫无生机。任何有能力进行星际旅行的生命，也有能力发动星际战争。格雷格·贝尔在他的小说《上帝的熔炉》和《星之砧板》中写到了这种可能性。在第一部书中，有一个外星种族毁灭了地球；而到了第二部，地球的幸存者要前往外星人的母星进行复仇[32,34]。外星人毁灭我们地球的原因有点牵强，他们似乎只是先下手为强，担心如果不毁灭我们，我们就会发动侵略，毁灭他们的世界。我觉得，这个理由应该也可以成立，就像前文引用过的戴蒙作品片段中，将心比心，大家彼此都不放心，但多少还是有点而牵强。在尼文和波奈尔合写的《怒足天降》一书中，这帮外星侵略者的动机，是因为输掉了本星球的地盘争夺战，要把地球作为新的立脚点。这里，我们再度见识了尼文掌控局面的能力。本来，有能力进行星际穿越的种族，消灭 21 世纪的人类应该只是几秒钟的事儿，可是尼文笔下的外星人却显得有点儿傻。因为他们只是更早时期一个高度发达的外星生命制造出的奴隶，在主人已经灭绝之后，才迟钝地踏上了外星扩张的道路。这种像大象一样笨重的外星人，平常都是在借用其他种族的技术，自己的心理状态更像是一群食草动物。只有在这种情况下，人类才能在苦战之后，成为它们的主宰。尽管在故事开头，外星人们还丢了一颗小行星到地球上。

外星人入侵地球的能源成本并不一定要很高。很多作者都写过外星人用微观方法入侵地球的事例：它们可以用恒星风吹送微生物进入地球；或者外星人也可以广播无线信号入侵人类计算机系统，给我们提供误导性信息，正如电影《异形》中展示的那样。此类入侵的动机不容易判断，大概只能归结为一条："所有不是人类的外星人都是大坏蛋。"这基本上就是大部分电视和电影节目的出发点。人类传播病毒的动机，当然主要是为了好玩，认定文明高度发达的外星人不会穿越星空使用"爱神"病毒，似乎也不是很明智。

利用微生物传播外星生命的做法，很可能来自弗雷德·霍伊尔和钱德拉·维克拉马辛的生源说，他们认为地球生命来自彗星，是它们带来了生物产生的基础。在漫长的宇宙演变过程中，细菌和病毒在辐射作用力影响下从一个星系扩张到新的星系。最终，可能是出于偶然或者预谋（比如，按照弗朗西斯·克里克的定向扩展理论）出现在某个世界上，在条件成熟的时候开始出现生物。这类观点，值得花一些时间进行科学的评估。

正如前几章提到过的，光会对它照射到的物体施加作用力，这就是物质-反物质（以及光子）火箭的原理。作用力的大小可以用下列公式计算：

$$F_L = kIA/c \tag{16.1}$$

其中的 $I$ 是单位面积上入射光总强度，$c$ 是光速，$A$ 是物体的表面积，$k$ 是无量纲系

数，描述对象的散射光能力：$k$ 与光线的波长与对象的形状有关。如果照射对象与光线波长相比较大，$k$ 的取值范围为 1/2～2。我们暂时假设其值为 1。

如果我们假设通过太空释放的微生物是球形的，那么它的表面积公式是

$$A = 4\pi r^2 \tag{16.2}$$

其中 $r$ 为半径。其质量是体积乘以平均密度($\rho$)：

$$m = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho \tag{16.3}$$

微生物的加速度等于其受到的作用力除以质量：

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{3kI}{r\rho c} \tag{16.4}$$

对象质量越小，加速度就越大。在地球公转轨道上，光照强度（阳光的密集度）为 1360W/m²；如果我们假设这些微生物的密度与水相当（1000kg/m³）。而半径为 1μm($10^{-6}$m)，就可以得到一个 0.01m/s² 的加速度。这看起来数值并不大，而且微生物离太阳越远，加速度也就越小。但如果在 1AU 的距离上始终保持这个加速度的话，细菌的速度还是可以达到 64km/s，已经超过了太阳系的逃逸速度。它还是没有办法很快到达任何地方，但是 20 000 年之后，理论上还是可以到达半人马座 $\alpha$ 星所在的恒星系统。一种看似比较合理的侵略方式，应该是使用转基因细菌或者病毒，甚至只是用基因原料，以便给其他星球填充高级生命系统，让投放这些材料的外星人占领其他星球。这样做的成本会比派出全副武装的外星战舰便宜很多。一枚细菌，哪怕是达到光速的 86%，具备的动能也不过是 400J。不过，一旦到达目的地，我还真是想不出任何让它减速的办法（尽管这不代表没有办法）。戈罗德书中的赤拓星人入侵地球，使用的大概就是这种方法，不过作者还没有揭开这个秘密。不管速度快慢，由于其极高的能源利用率，这种入侵方式的确比其他方法都更为合理。

### 16.2.2 贸易或"启蒙"

*当你在星辰间做贸易的时候，绝不可能会有回头客。*

*——拉里·尼文《第四种职业》，选自《无尽的路途》*

星辰间的贸易往来面临的困难显而易见：巨大的能量和时间消耗使其几乎不可能存在，或至少让实物贸易不可能存在。考虑一下下列事实：即便是达到光速

的86%,往返半人马座α星一趟就需要10年,而这已经是宇宙间最近的星系。其成本也非常惊人。质量为1kg的物品达到这么快的速度,其动能就可以达到 $9\times10^{16}$J。按照美国目前每度电10美分的售价,这就是每千克运费3亿美元。这还不是成本的全部:相对论火箭方程告诉我们,你需要1.4kg的反物质加上同等质量的物质来作为燃料,才能让1kg的有效载荷达到上述速度。还要考虑到达目的地减速、返程加速、快要回来时再减速。有了这些困难之后,很难想象还有任何事物值得在恒星之间进行贸易并且有利可图。这就是电影《阿凡达》故事前提崩溃的地方:开采所谓的超导矿石(Unobtanium)所花费的成本,很可能至少要比电影中提到的每克2000万美金的售价高出一个数量级。

星际信息交换成本要便宜得多。星系之间的无线通信交流,要比任何物质交换速度更快,成本更低。无线信号可以用光的速度传播,超过任何物体移动的速度。20世纪50年代,科科尼和莫里森的研究证明,使用当时已经掌握的射电望远镜技术可以在10光年以外发现地球的无线通信信号[60]。也就是说,星际生命之间的无线通信是有可能实现的。可是,我们有什么需要告诉外星人的信息吗?我上面也提到过这个问题,其实外星人不理会我们,也可能因为它们没有什么话需要跟我们说。但是,就算它们只说了一句"嗨",然后就没了下文,也会是人类有史以来接收到的最重要的无线信号。

### 16.2.3 火星需要女人!

*人类和沃肯星人婚配产生后代的成功率……跟沃肯星人与牵牛花交配产生后代的几率差不多。*

*——卡尔·萨根在1968年发表于《纽约时报》的文章*

其实这主要是一个玩笑。任何称职的科幻作家都知道,不同物种之间的"恋情"是不太可能成功的。地球上多数物种的遗传信息都储存在脱氧核糖核酸(DNA)中。这几乎不可能是唯一的遗传信息传递方式。所以,外星人在这方面与我们"兼容"的几率近乎为零。即便他们的遗传信息也用DNA存储,外星人跟人类依然属于不同的物种。拉里·尼文曾在文章《男如钢铁女如云》中写道,外星人与地球人之间的性关系,真的是像汤姆·雷若说的那样,算是"兽交"。

而且也没有什么道理要求他们长得像人样。电视节目里的外星人总是跟人

类很相像，那是因为演员更容易扮成那副样子，难度小于扮演原生质泡泡。也许安娜·卡列尼娜原则在这里还能发挥影响：可能会有一些原因，迫使会使用工具的智能生物长相多少跟人类有一些相像，不过除非是亲眼所见，否则我们就无从断言。

### 16.2.4 非常神秘的接触动机

很多科幻小说爱写难以捉摸的外星人。它们与人类接触的动机既难以理解，又无从猜测。这类小说的作者通常既不是美国人，也不是英国人，而是来自前社会主义国家的居多。在俄罗斯长篇科幻小说《路边野餐》中，作者阿卡迪·斯特鲁伽茨基和鲍里斯·斯特鲁伽茨基兄弟笔下的外星人不只是让人猜不透，而且还是隐身的[230]。小说中，外星人的"造访"改变了地球上的几个地方，在那些地区物理法则失效、神迹发生（通常是致命的类型）、勇敢的寻宝者能够发现宝藏、外星人完全躲在幕后（你甚至不知道他们是否存在）。它们来过的唯一证据是"皮尔曼辐射线"，那是太空中人们想象出来的一条线，外星人似乎就来自那里。发现辐射线的皮尔曼博士说，这些外星人的造访就像是突然发生的路边野餐，野餐客乱丢垃圾，把周围弄得乱七八糟却不去收拾，但他也无法确定这就是外星人的动机。斯坦尼斯拉夫·莱姆在他的《微世界》中给出的访问理由较为正大光明，但并不一定准确[150]。我怀疑，《路边野餐》就是科幻迷你剧《谜之屋》主要的灵感来源，但却无法证明。迷你剧中发生的那些事件，就是很像小说中的外星人造访。

斯坦尼斯拉夫·莱姆写过两部小说，其中的外星人来访动机都不清晰。一部是《索拉里斯星》，另一部是《主人的声音》，还有一部翻转了局面的《丑闻》。在最后一本书中，我们人类去跟外星人进行接触，但自己的动机却完全被误解[151]。《索拉里斯星》一书中，一颗智能星球对一位来探查的宇航员进行了一系列实验，但动机不明[148]。在《主人的声音》一书中，科学家截获了一段外星信息，却完全没有能力解读；人们尝试了很多次，碰巧做出了不少有趣的发现，可是那段信息本身始终没有任何头绪[147]。

菲利浦·K.迪克是极少数写过"猜不透的外星人"类型小说的美国人之一。在《银河补罐人》一书中，男主角（一个修补陶器的"补罐人"）被牵扯进了遥远行星上的两派争斗之中。他对交战双方的动机和能力都只有极为模糊的认识，他们好像是为了把一座沉入水底的大教堂打捞出来而大打出手[68]。我觉得这样的故事

真实可信，因为即便是跟我们的近亲猩猩，人类也很难进行充分交流，又怎么指望能理解外星人呢？不过，把这些顾虑先都放到一边，我们回到现实中来，不管能不能懂得外星人的意思，先想一想我们找到外星人的机会有多大。

## 16.3　德雷克方程模型与外星接触的数学评估

如果我们明天就收到了外星人发来的问候，我们会相当确信他们来自 50 光年以内。因为我们地球使用无线信号才不过上百年。所以，如果收到外星信息，就是他们意识到了我们的存在，而且在 100 年内收到并回复了我们的信号。（收到外星信号）意味着我们星系的外星文明密度大致为每(50 光年)$^3$ 范围有一个，或者 $8\times10^{-6}$(光年)$^3$。银河系是一个旋涡形星系，共拥有 $3\times10^{11}$ 颗恒星。直径约为 $1\times10^5$ 光年，厚度约为 1000 光年。所以，银河系大致可以看作一个圆柱体，圆面半径 $R=5\times10^4$ 光年，高度为 1000 光年。也就是总体积 $\approx8\times10^{12}$ 光年$^3$。如果外星文明在银河系分布均匀（这应该不是什么很可靠的假设），那么明天收到信息的事实，可以证明整个星系有 6400 万个先进文明体系。这个数字看起来大得令人难以置信。当然，外星文明的数量越少，与它们对话需要花费的时间也就越长。

让我们为此做一个简单的模型。假设我们星系的文明数量可以表示为

$$N=gL \tag{16.5}$$

其中的 $g$ 是“产生率”，对应的数量是银河系中每年新“诞生”的具备了星际航行能力的生命数量；$N$ 是在任何时间点上银河系存在的此类生命的数量；$L$ 是这些文明能够存续的时间。让我来打个比方，帮助大家理解上面的公式。想像你自己，深更半夜站在乡间漆黑一团的草地上。周围有些萤火虫时明时灭。那么，你每次同时看到超过一只萤火虫闪亮的几率是多少呢？这取决于两个因素：一是平均每秒钟有多少只萤火虫开始点亮它的小灯；二是点亮之后，它能持续亮多长时间。如果每秒有很多小虫开始闪亮，而且持续时间较长，你就能同时看到很多光点；而相反情况下，如果每秒钟开始闪亮的萤火虫都很少，点亮之后也只能持续很短时间，那么你就很难同时看到超过一只萤火虫闪亮。每秒钟开始闪亮的萤火虫数量就是 $g$，它们保持闪亮的时间就是 $L$。宇宙中智能生物的存在，也就像这些萤火虫一样，是无尽黑暗中的一些小小光点。

目前，这所有的三个变量，$g$、$L$、$N$ 全部都是未知数。睿智的读者可能已经发现，这其实就是德雷克方程的一个版本。1960 年，弗兰克·德雷克提出了一个统计模型，用来估计银河系中的外星生命数量。他最早提出的方程是这样的：

$$g = G f_p n_e f_l f_i f_c \quad (16.6)$$

这里值得逐个解释各个变量：

- $G$：每年新形成的恒星数量。这是上述方程中唯一能够粗略估计出数值的倍数，$G \approx 7$。
- $f_p$：星系中拥有行星的恒星占所有恒星数的比例。1960 年，人们只知道有两颗系外行星存在，现在已经发现了 700 多颗。根据对已知系外行星的统计，$f_p$这个变量的值很可能是在 0.05～0.2 之间（5%～20%）。正如前面的章节讨论过的，恒星的金属成分含量越多，越容易被发现有行星，此外这还跟恒星本身的质量有关。
- $n_e$：每颗恒星周围可能具有的类地行星数量。对这个数字的估计，目前存在很大问题。正如前文所说，一颗行星能否被判定为“与地球类似”取决于多方面的因素，有些因素还彼此相关。根据你的定义不同，我们的太阳系可以说有三颗与地球类似的行星，也可以说只有一颗。但每一个恒星系统中可能具有的类地行星数量，可能要比太阳系少得多。
- $f_l$：类地球行星上有生物存在的比例。这个变量与后面的两个变量，都是人们完全不了解的。这个比率有可能比较高，因为地球形成了仅仅 7 亿年就已经开始出现生命。
- $f_i$：有生命的行星中进化出智能生物的比例。
- $f_c$：智能生物中学会向星系外发送信息方法（如无线通信技术）的比例。

不用说，上面的方程和对它的解读都引发了很多争议。德雷克在回应质疑时说，这个方程就是为了“将我们的无知条理化”，只有在所有变量彼此不存在统计意义上的相关关系时，上面的公式用来估计外星文明数量才能保证准确。而这不太可能符合实际情况。尤其是考虑到变量 $n_e$ 的时候，你到底把怎样的星球看作“与地球类似”？就这个问题本身，也可以编写出自己的迷你版德雷克方程：我们可以用生命区间中的恒星数量，乘以轨道偏心率较小星球的比例，再乘以质量处于理想范围内的比例，再乘以……

无论如何，对得到 $g$ 的大多数变量，我们都还没有足够的理解。我们也不知道 $L$ 的值是多少，$L$ 是高级生物常见的寿命。不过，这里“高级”的含义仅仅是“有

能力接收和发送能够跨越星系的信息”，否则我们就无法联络到它们。我们地球人获得这种能力，才不过 110 年。这可以算作 $L$ 的下限，但 $L$ 的上限是多少，并没有人知道。

迈克尔·舍默在《科学美国人》杂志发表的一篇文章中说，人类文明的平均寿命是 420 年。他所研究的文明都是工业化时代之间出现的。但是，如果以科技为基础的社会也只能有这么一点点寿命的话，就不要指望能找到什么外星人了[218]。网上关于这篇文章的讨论很热烈，但舍默的论述绝对不缺乏逻辑。原因之一是：任何高级文明体系的根基都是能源系统，而我们当前社会的能源全部来自不可再生资源。如果继续当前的使用频率，可能不到 100 年就会耗尽。我们在后面的章节中还会讨论人类文明的延续能力，目前还是回到外星人的问题，有了上面这么多的不确定因素之后，我们对找到外星人的可能性还能得出怎样的结论呢？

首先，我们希望 $gL>2$，这样才能有那么一个外星物种跟我们人类聊天儿。这并不是什么快速有效的答案，因为这些数字都是平均值，但像是一个合理的最低要求。不幸的是，即便能得偿所愿，这也只是个必要条件，而不是充分条件。我们还要找到与外星人通信的渠道，假如他们的距离太远，我们文明体系的有生之年就很难跟他们建立联系了。

如果银河系中的生命分布均匀，我们就可以把他们想象成均匀散布在一个圆柱形区域内，圆面半径与高度的比值很大（约 100 ∶ 1）。如果文明之间的距离超过 1000 光年，那么我们的讨论就更像是针对一个平面圆盘进行的。只需要知道在这个半径等于 50 000 光年的盘面上，单位面积能有多少种星际生命。如果我们从地球发出一段无线信号，而希望外星人能够在时间 $t$ 之后收到它，那么 $N$ 与 $t$ 之间的关系就可以表达为

$$N\frac{(ct)^2}{R^2}\geqslant 1 \tag{16.7}$$

这是一个简单的概率问题：预期能够收到信号的文明数量，等于信号覆盖的面积范围（忽视了银河系的厚度之后）乘以此类文明的密度（从现在开始，我将在 $c=1$ 的单位系统中工作，以简化计算）。

如果我们希望收到回复信息。那么 $t\leqslant L/2$，也就是说，假设我们试图联络的文明寿命有限，他们最好在死光之前能够我们回信。由此，我们可以给地球文明的寿命设置一个下限，要满足这项要求，才有可能完成与外星人的对话。通过使用 $N=gL$，我们可以得出

$$L>\frac{(4R^2)^{2/3}}{g^{1/3}}\approx 2000\ 年\cdot g^{-\frac{1}{3}} \tag{16.8}$$

于是我们就有了两个标准：

$$L>\frac{2}{g}$$

和

$$L>\frac{2000}{g^{1/3}}$$

两个标准都必须达到，才有可能实现人类与外星人对话。图 16.1 演示了上式的含义。请注意，越是向右，$g$ 的值越小。

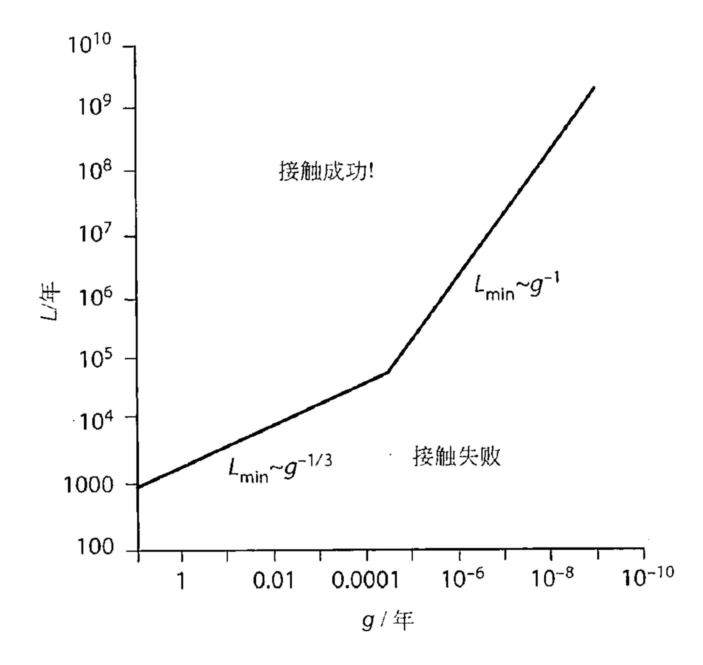



图 16.1　成功与外星人完成接触所需的 $L$ 最小值

这张图可以分为两个部分，在函数曲线以上，外星接触有可能实现。这是假设外面有足够的外星生命，而我们的文明也能持续到跟他们完成对话的时间。在函数曲线以下，外星接触不太可能实现，原因或者是因为银河系没有那么多外星文明可以发现，或者是距离太远，对话还没能实现其中一方就已经玩儿完。

对 $g$ 值较小的情况，较难满足的是第一个方面的条件。不管你能怎么做，银河系在任何时间存在外星文明的几率就是不高。不过，随着 $g$ 值变大，比如达到每年 $3\times10^{-5}$，难度开始转为第二个方面，就是生命持续到星际接触完成的时间。

很可能每年 $g<10$，因为每年产生的恒星数量都少于 10 个，而考虑的因素越多，$g$ 的值就会变得越小。我们能得出的结论是，不管其他因素怎样，一个生命体系的寿命都必须大于 1000 年，星际接触才能有机会完成。这就带我们进入了本书的最后一个大问题：智能生物建立的文明体系，到底可以存续多少年？

**注：**

A. 吉布森是一个非常有趣的例子，他一直渐渐从作品中减掉传统科幻中的必备元素（例如外星接触和星际旅行），而却始终保留了作品的科幻风味。

第四部分

# 古戈年

# 第 17 章

# 人类的短期生存前景

## 17.1 我们的世界将这样落幕

这一部分主要是为了回答一个简单的问题：人类能够生存多久？首先，我必须向四面八方的听众严正声明一下：我对这个问题的答案绝对不是现实主义的，而是尽可能狂想，看物理学规律能容许我们人类存在多久？在此过程中，我会首先考虑人类灭绝的各种可能性。我们在这个方向上大踏步前进，首先考虑在未来 100 年左右，人类能怎样折腾自己；然后考虑更为久远的天文学灾变；根据我们目前掌握的知识，如果人类足够幸运的话，我们的物种会有希望延续到古戈年，也算是千秋万代了。

## 17.2 短期风险，人为制造的灾难

那么，人类将走向何方？回答这个问题的过程中，我从两本书里受益颇丰，它们是《最后的人和最初的人》以及《造星主》，应感谢其作者奥拉夫·斯塔普尔顿，活跃于 20 世纪 30 年代的英国科幻作家。两本书都是关注宇宙中生命长期存续前途的力作。《最后的人和最初的人》思考了直到数万亿年后的人类前景。那时，我们的后代已经进化成了具备超高智能的巨人，他们头上都配有望远镜，生活在海王星上（小说中有上下文，读起来完全不别扭）。《造星主》更是格局宏大无比：作

品试图跟踪整个宇宙所有生命的演化过程，直到人类灭绝之后的无数纪元；描写了生命体的终极探索，试图理解宇宙及其创造者的事业（最终未能成功）。在此过程中，斯塔普尔顿描述了极为丰富的物种陷入灾难后恢复（或未能恢复）的历程，以及他们提升自身的努力。尽管这本书写作于 80 多年前，至今却仍是科幻作品中宏大视野的最佳代表。除了其他种种优点之外，斯塔普尔顿还最早提出了后来被命名为“戴森球”的设想。

当然，想要人类延续到所有恒星熄灭之后的久远年代，我们首先要活过这个世纪才行。短期内，最可能毁灭整个人类的威胁就是——人类自己。

### 17.2.1 核战争

*但是我们应该感恩，平静而骄傲*
*因为人类得到了这些天赐的蘑菇云*
*让大家终于能够确信*
*早晚会有人会发出信号*
*而我们马上就全部死掉！*

——金斯敦三人组 《欢快的小步舞曲》

我小的时候，最流行的人类灭绝设想就是全面爆发核战争。有无数的长短篇科幻作品与核战有关，参战双方往往是美国和苏联。其中，内维尔·舒特[①]的《在海滩上》是最优秀的作品之一。作品描写了核毁灭之后的余威，当时还有一些幸存者，无奈地坐视放射性浮尘杀死剩余的所有生命。多数此类作品都创作于 20 世纪 50—70 年代，当时冷战正处于高峰期。那时候还有些科幻作品，写道外星人光临地球，制止了人类毁于核战的命运。其中最优秀的是阿瑟·克拉克的作品《童年的终结》，因为里面有一个神妙的转折：外星人的确帮我们挽回了被灭绝的命运，不过他们也有自己的目的。我不会再剧透更多，因为假设你没有看过这本书，就需要找来看看了。书有点儿老，不过情节的冲击力还是像头骡子踢腿儿那么带劲。

早年间的汽车贴纸，有时还会写这样的俏皮话：“小心！我有核弹，靠近了你就玩儿完！”但迄今为止，核弹仅仅在“二战”结束前被使用过。当时美国动用了两

① 内维尔·舒特（Nevil Shute，1899—1960），英国人，既是一位成功的小说家，也是一位航天工程师。

颗万吨级原子弹，炸毁了广岛和长崎两座城市。伤亡数字统计口径不一，但这两颗原子弹至少让两座城市各死亡10万人以上。市中心完全被摧毁，轰炸和辐射物残留造成的人员损失规模令人震惊。我们这里没有足够的篇幅来充分展现那场灾难。读者可以参考《原子弹的制造历程》一书最后一章，作者理查德·罗德斯能给你提供足够的细节[197]。

冷战巅峰时期，美苏两国的核弹总存量，大约相当于广岛原子弹威力的一百万倍。不过这里还有一个“有趣”的细节。原子弹能够造成彻底毁灭的半径，并不与其能量级别成比例，而是与其平方根对应。举例来说，毁灭广岛的万吨级原子弹，很可能足以荡平曼哈顿区，这个地区的长度约为1mile。但百万吨级的氢弹，虽然拥有100倍的能源，却不能炸毁方圆100mile的范围，而是只能毁灭方圆10mile的事物，大约是五个小城镇的面积。因此，美苏两国的原子弹相加，总共可以毁灭半径1000mile的一大片区域。已经很大，但还不至于把整个地球炸毁。我不是想低调处理这样可怕的武器将会造成的灾难——这远非我的本意。我十几岁时生活在华盛顿郊区，有时候我会整夜睡不着觉，因为害怕所有人都会被核弹毁灭。核弹如果发射，目标肯定是人口最为集中的大城市，因而其影响肯定是灾难性的。冷战时期的战略专家，曾经以“百万死亡人数”为单位评估威慑效果。《奇爱博士》中的同名主角，就是对这种冷血人物的绝妙讽刺。全面核战争导致的死亡人数，最少也会有上千万，最多可能会有上亿人瞬间死亡，而这还没有计入随后将死于核辐射的等量受害者。

不过，虽然有这么可怕的结果，核战争本身却不会直接杀死这个行星上的所有人。现在全球生活着70亿人。核弹轰炸和随后的辐射也许会杀死全球人口的1%～10%。全面核战最大的威胁，并不是炸弹本身的直接破坏力，也不是此后残留的核辐射，尽管两者都非常可怕。但最危险的，还是核战后的核冬天。

考虑下列数字，千万吨级的氢弹破坏力约为$4\times10^{16}$J。爆炸除了会产生热量和冲击波以外，还会有大量尘土和颗粒物被抛入平流层[97]。平流层是地球大气的最高层，大约从地面以上100km处开始。将1kg物体抛入此处所需的能量为

$$E = mgh = 1\text{kg}\times10\text{m/s}^2\times10^5\text{m}\approx10^6\text{J}$$

即便只有1%的氢弹爆炸能量被用于抛洒尘土进入平流层，每百万吨级的氢弹也会抛上去$4\times10^7$kg物质。我们上面的估计非常粗略，所以也不能指望有多么精确，误差在一个数量级之内就算不错了。多数有关全球变暖的论文，都假设每百万吨核爆产生$3\times10^8$kg平流层废物。此外，还要考虑城市与树木燃烧产生

的烟尘[200]。这些微尘要花费很多时间，才能从大气中分离出来，甚至可能长达数年。在此之前，它们都会阻挡太阳光到达地球表面。即便是一场小规模核战，比如印度和巴基斯坦交火这种级别，都可能导致全球气温下降 1℃左右，最终导致全球农业格局发生剧变，甚至发生饥荒。

这种情况被称为"核冬天"，在第 21 章我们讨论人类的长期生存前景时，还会改头换面后重新出现。总之，如果因为大规模核交火导致地球气候出现明显变化，那么人类现有人口中的很大一部分，都会因为农业遭受的损失而最终丧命。

### 17.2.2 全球变暖

不过当前，我们地球面临的最直接威胁却是变得太热，而不是太冷。自从苏联解体以来，人们对全面爆发核战的担心已经在很大程度上消退。流氓国家或者恐怖组织拥有核武器的风险依然存在，但全球因为大规模核战彻底毁灭的风险的确有所降低。自从苏联解体以来，全世界的核武器存量下降了三个数量级。2010 年，原子科学家协会的末日之钟，从差五分到午夜十二点(象征毁灭时刻)被拨回到下午六点。但到了 2012 年，又被重新调回了午夜前五分钟，这次是因为全球气候变化的影响。

多数人都对"全球变暖"这个词儿有一点点了解。事实上，这里有三个词组需要了解："全球变暖"、"全球气候变化"、"人为温室效应"。简单的事实是：由于我们这个工业化文明持续排出大量的二氧化碳($CO_2$)和其他废气，全球气温近年来一直在上升，这一趋势已经存在了 200 年。国际气候变化政府间专门委员会(IPCC)在 2007 年发布的报告中估计，2100 年前，全球平均气温可能还将出现 2～6℃的上升，将对人类社会带来不可预知的严重后果[223]。[A]

在我开始讲解人为导致的全球气候变化之前，再说几句题外话。有些人好像觉得，全球气候变化还是个有争议的议题，并不是每个人都相信这个问题存在。苍天啊，大地啊！那些穷其一生研究这一理论的人(例如气候专家们)，在这个问题上的立场几乎完全一致。全球变暖问题不只存在，而且非常危险。到现在，全球变暖的势头已经不可逆转(尽管还能部分缓解其危害)。未来一个世纪全球气温将大幅上升，这已经是无法改变的趋势。目前的争议全都集中在细节上。比如全球各个地区分别将承受多大危害之类。全球变暖理论的争议，跟生物进化理论目前面临的争议是同一个性质：科学家们普遍相信它。不相信的人，要么是害怕由此引申出的后果；要么就是出于维护自己利益的私心，徒然地妄想这

不是真的。

当然，全球变暖也早就进入了科幻小说的视野。金·斯坦利·罗宾逊①曾完成一套三部曲，涉及全球气候变化问题。三部曲之一《雨的四十个迹象》描写了地球跨越一个"临界点"带来的影响，在那以后，人类文明开始应付快速恶化的气候环境[199]。

在第 14 章，我们已经讨论过温室效应背后的数学。用一句话总结：地球大气中的某些成分会把热量保留在地球表面附近，从而导致地面温度升高，其道理跟毯子或者外套能保暖一个样。自然界存在的温室效应整体作用是正面的。如果没有温室效应，地球表面温度会下降 30℃，足以让大多数地区一年大多数时间都冰天雪地。但是，自从詹姆斯·瓦特发明第一台具备商业推广价值的蒸汽机以来，人类一直在大量燃烧煤炭（后来是石油）来满足快速扩张的工业化社会需求。这导致地球大气中的二氧化碳浓度上升，目前已经比前工业化时代高出了 33%。第一位想到人为因素导致温室效应加剧的科学家，是 1903 年的诺贝尔化学奖获得者斯万特·阿仑尼乌斯[141]。他在该领域最初发表的论文，是第一份重要的现代气象科学研究成果。他的工作方式与现在的气象学专家类似，利用复杂的地质信息系统模拟温室效果带来的影响，只是当时他没有计算机来辅助研究工作，手工计算温室效应可能造成的影响规模花费了他长达数年的时间。不过，他最终得出的温度上升几摄氏度的结论，与现代计算机模型得出的结果极为接近。他个人认为，全球气温上升、热带范围扩大，不是什么坏事儿。他之所以这么想，大概因为他生活在瑞典[141]。

国际气候变化政府间专门委员会（IPCC）的预测数字，基于非常复杂的计算机模型，这些计算机所做的计算工作，跟一个世纪之前阿仑尼乌斯的手工计算毫无二致。计算机模型将地面分成不同的三维网格，其平面分割区域是边长数千米的正方形；而大气状况则沿竖直方向分层研究，每层厚度大约 1km。模型考虑的因素包括来自太阳的热量、地球表面反射光的比例、大气电离层和云层反射率、温室气体保留下来的热量，再加上由于空气对流在大气各层次之间的热量传递[157]68。不同模型之间进行过大量比对，也参照当地气候观测数据进行过大量校正。多数模型设计者都会参照火山爆发后地球的冷却机制，比如 1993 年的皮纳图博火山爆发，和 2010 年的冰岛艾雅法拉火山爆发等。

---

① 金·斯坦利·罗宾逊（Kim Stanley Robinson，1952— ），生于美国加利福尼亚州，当代科幻小说名家。多次获得雨果奖和星云奖，代表作有《火星三部曲》、《海岸三部曲》等。

在第 14 章，我们提出过一个简单的“双层”大气模型，来估算温室效应影响下的类地行星表面平均温度。模型中的两个层次分别是行星地面和整个大气层。当时的自变量有四个：恒星亮度，以太阳亮度的倍数表示；行星距离，用地球到太阳距离的倍数表示；行星平均反照率 $A$（地球的 $A=0.3$），以及被大气中的温室气体保留的辐射比例 $f$。对地球而言，代入相应数字到公式中，计算得出的行星温度是

$$T=278\text{K}\times\sqrt[4]{\frac{1-A}{1-f}}=\frac{254\text{K}}{\sqrt[4]{1-f/2}} \tag{17.1}$$

温室效应最为重要的裨益，就是有利于地球生物的存续。如果没有大气中温室气体的保暖作用，如果上式中的 $f=0$，那么地球表面的平均温度将仅有 254K，或者记作−19℃。根据这个简陋的模型，我们可以根据目前地球的实际平均温度 288K，算出 $f$ 的当前数值为 0.77。当然，这个公式无法告诉我们 $f$ 将来会怎样变化。这个计算过程会非常复杂，因为你需要知道所有主要温室气体的红外线吸收波段和吸收能力，而这些数字又会随着空气浓度和气压数值发生变化。对温室气体吸热能力进行建模，是大气温度预测模型的主要难点之一。$f$ 的值取决于温室气体集中程度，但在达到一定浓度之后，其数值并不会因为温室气体增加而简单累加。当然还需要考虑到，不同气体吸收辐射的能力并不一样。比如说，按照单位质量的吸热能力衡量，甲烷的辐射吸收能力是二氧化碳的 20 倍。不过，地球大气中的二氧化碳含量，又比甲烷高 300 倍。所以二氧化碳对全球气候变暖的影响力，要比甲烷高 10 倍以上。水蒸气是最为重要的温室气体，起到全部温室气体效应的 80%，二氧化碳作为排名第二的影响因素，起到的效果约占 10%。其他气体对它的影响幅度，都在个位数以下。

我将提出一个新的简单模型来描述大气吸热能力变化带来的气候变化。如果大气吸热能力增加 1%，地球气温会升高 1%吗？答案是否定的。我们可以利用微积分知识和式（17.1）来得出下面的方程：

$$\frac{\Delta T}{T}=\frac{1}{4}\frac{\Delta f}{f} \tag{17.2}$$

如果 $f$ 值上升 4/100，地球温度将大致上升 1/100，也就是大约 3℃，因为目前的平均温度约为 300K。对于人类造成的温室效应，可以非常粗略的估计一下：二氧化碳造成的温室效应约占 10%的份额，由于从公元 1800 年以来，空气中二氧化碳的浓度已经升高了 25%，那么温室气体的总“强度”应该是提高了 2.5%。根据式（17.2），由此造成的全球气温上升幅度约为 0.6%，或者说 2℃。

从一个非常简陋的估计数出发，能得出这样的结果已经不错了。真实情况是，从 1800 年以来，全球气温上升的幅度为 0.75～1.5℃，与我们粗略的估计值相差大约 1 倍。

全球变暖的具体影响无法精确预知，但对人类恐怕不会是好事儿。目前预测的情况，包括越来越严重的旱灾，尤其是在加利福尼亚州这种饱受旱灾所苦的地区。而且，我们将经历更为频繁、更具破坏力的飓风灾害，可能导致数十亿美元的经济损失。极地冰层将会融化，海平面随之上升。此外，还会有其他若干让人头痛的变化。最糟糕的情况是，美国相当一部分地区将变得不适合人类居住及进行农业生产。因为美国 30%的农产品都来自加州，这可能带来非常严重的后果。食品价格飞涨，已经是所有威胁中最为温和的了。

有人可能会觉得这不可思议。但事实上，美国 20 世纪已经经历过类似的生态灾难，只不过规模小了一点。那就是 20 世纪 30 年代俄克拉何马州沙尘灾害。当时，西部各州农田的过度开发加上持续几年的干旱，导致大面积的表层土壤流失、庄稼歉收，农民大量迁出受灾最严重的区域。加上当时的经济大萧条，农田受旱让很多居民的生活水深火热。我想破例介绍一部非科幻作品，就是约翰·斯坦贝克的小说《愤怒的葡萄》，这是用小说形式的虚构，对一个家庭抗争此类灾难过程的真实反映[226]。近年来，由于对气候变化有了更为深入的了解，考古学家们也渐渐发现，气候因素对古代历史有着深远的影响。贾里德·戴蒙的小说《崩溃》与伊丽莎白·科伯特的小说《灾情实录》，都对气候变化影响下的古代和史前文明做出了犀利的展示[66,141]。如果你想听点儿好消息的话：或许不等我们把空气破坏到那样的程度，地球上的化石燃料就会被消耗殆尽。

### 17.2.3　赫伯特峰值

*对石油产业而言，过去的一个世纪堪称发现和冒险的时代。大陆架附近成片的储油区被发现，并部分开采完毕；出现了几十处超大型油田，面积与较大的海岛相当；此外还发现了几百处小油田，小的“资源海岛”。但是多久以后，我们的勘探和发现就会走到尽头呢？*

——M. 金·赫伯特　《核能与化石能源》

我还是 8 岁孩子的时候，记得曾经被迫在车里呆坐 1 个小时，等着我妈妈给汽车加油。那是 1973 年，石油输出国组织(OPEC)短期禁运的阶段。当时很多波斯

湾沿岸的国家不再向美国出售石油，因为美国在“赎罪日战争”中支持以色列。美国政府实施了汽油限购，按照每人车号的最后一位数字，轮流限制购买汽油。石油禁运没能持续很长时间，因为美国和波斯湾沿岸的国家“相互依存”。但是美国在历史上，却曾经是全球第一大产油国和第一大石油出口国。现在，我们只是第17大产油国，而且在石油进口国排行榜上唯我独尊、遥遥领先。我们生产的石油，仅够国内消费规模的1/5。这怎么回事？

其实就是没油了吗？嗯，不完全是。我们国家的石油还没有完全用光，但资源储量水平已经很低。问题很简单，如果油罐容量只有10gal，你不可能一次从里面倒出11gal。1972年，是美国第一次无法生产足够原油供国内消费的年份，也让美国因此容易受到石油输出国组织禁运的负面影响。所有人，包括石油输出国组织成员自己都很意外，没想到禁运这招能这么管用，这至少导致了足够的混乱和恐慌，而且出乎所有人预料。

嗯，也不是所有人都感到了吃惊。M.金·赫伯特，为壳牌公司工作的一位地质物理学家，在很早以前就已经预见到了石油危机的到来。1956年，他发表了一篇富有远见的论文《核能与化石能源》，在文章中，他把19世纪末20世纪初的石油勘探活动比作大航海时代的地理大发现。当时，西方各国逐渐揭示了整个世界的地图。他认为，地理大发现的初期跟石油勘探初期一样，谁都不知道能发现什么，也不知道世界有多大，石油有多少。但等到1956年，赫伯特觉得，全球主要的石油储藏地（尤其是美国周边）应该都已经被找到，当时已经可以对全球石油总储量给出一个合理的估计。他写道：“在探测石油的过程中，我们得到的，似乎总是仅限于一个地区的详细地图。只有极少数情况下，会有人试图构建全球的石油储量前景。这种努力尽管先天不足，却还是很有必要。因为只有这样，我们才会清楚目前已经找到了多少石油，将来还有可能再发现多少”。[126]

赫伯特在他的论文中重点强调的两个观点是：化石能源（煤、石油和天然气）总储量有限；全球各大文明国家对它们的消费规模在日渐扩大，事实上是在呈现指数式增长势头。历史上，1800年（工业革命开始的大致时间）之前的化石能源使用量极小。但是，随着全球工业化水平的提高，能源使用量也急剧攀升。20世纪50年代的某段时间，能源消费的年增长率曾高达9%。只要我们还有足够的地下石油资源，这样的增长就没有任何问题。但事实正如赫伯特指出的：地下石油资源的总量已经可以得到相对精确的估计。美国石油资源总量大约为2000亿桶，而全球总量大约为20 000亿桶[127][B]。

目前全球的石油消耗量，大约是每天8000万桶，或每年300亿桶。其中美国

的石油消费量约占全球总量的1/4。目前，全球石油产量与消费量大致持平。但是，石油业内人士常用的一条速算法表明：油井每年的产量通常大约相当于剩余石油储量的10%。所以，随着石油储量的减少，我们每年能够开采到的数量也会同步下降。所以说，我们会一直面临石油消费的指数式增长，直到有一天需求超过了生产能力，到时候我们使用能源的规模将不得不下降。这个道理还是非常简单：如果某种能源是有限的，你总有一天会减少它的使用量。指数式的消费增长率终归是无法持续。

描述这种状况的方法之一，是用逻辑严密的方程。下面就是相关的微分方程：

$$\frac{dx}{dt}=\gamma x(1-x) \tag{17.3}$$

其中的 $\gamma$ 代表（每年）的消费增长率。$x(t)$ 代表在时间点 $t$ 已经被消耗光的资源比例，取值范围为0～1，1就表示所有资源耗尽。我们更关心的，其实是消耗速度 $dx/dt$，因为这跟石油生产有着更为紧密的关联。其实用不着解这个方程，就能看出，当 $x=1/2$ 时，石油使用的规模最大，其数值为 $\gamma/4$。

这可以算是描述该问题最为简单的方程，因为 $\gamma$ 与石油（或者任何资源）的消费需求相关。因此，在1900年之前，$\gamma$ 的值基本上就是零，那时候人类刚刚从煤炭转向石油，令后者成为现代社会的主要初级能源。因此，这个方程可以看作是主要随时间变化的。特别地，当石油真正耗尽的时候，人类转向另一种能源形式，需求率又将急剧下降，或许又将变成零，更可能的是变成很小的非零数字。暂时我将把 $\gamma$ 看作一个不变的常数，看看随后会发生什么。目前全球的石油消费规模是每年300亿桶，1900—2010年间，全球石油消费总量约为10 000亿桶。因此，目前的 $x$ 值约为0.43（也就是说，我们已经耗尽了地底石油资源的小一半儿），根据这一数字可以算出 $\gamma=0.12$。我们可以从这个数字出发倒推一下，看它能不能反映全球石油消费的真实情况。请注意，上述数字都是非常粗略的估计，原因我会在下文说明。前文逻辑方程的解是

$$x(t)=\frac{e^{\gamma t}}{1+e^{\gamma t}} \tag{17.4}$$

而此模型中的资源使用率是

$$\frac{dx}{dt}=\gamma\frac{e^{\gamma t}}{(1+e^{\gamma t})^2} \tag{17.5}$$

请注意，在这个使用水平上，我们在 $t=0$ 的时候有最大的使用率。此外，从原

则上讲，这个公式的含义，是假设人类从无比久远的过去就开始使用石油。但事实上，工业社会仅仅是从 1900 年前后开始使用石油，年限仅有 100 多年，此前那么长的时间消费量一直接近于零，以至于可以忽略不计。然后我们就可以将使用比率乘以全球石油资源总量 $Q$，得出每个阶段的使用数量规模：

$$R(t) = Q\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = Q\gamma\frac{\mathrm{e}^{\gamma t}}{(1+\mathrm{e}^{\gamma t})^2}$$

我假设资源总量 $Q \approx 2.3$ 万亿桶。

这个模型得出的预期情形很有趣。图 17.1 展示了计算结果，根据目前已有的数字和当前每年 300 亿桶的石油消费规模，可知我们现在距离石油使用高峰还有 16 年的时间，届时全球年度石油消费量将达到 700 亿桶。之后，石油消费量将大幅下滑，高峰期后 16 年，消费量将回到目前每年 300 亿桶的水平。但是，我们的曲线与过去年代的实际消费量曲线吻合情况并不好，这倒也不令人感到意外。我们的指数增长曲线假设每年能源消费量增长 12%，这在几乎所有的国家都不可能

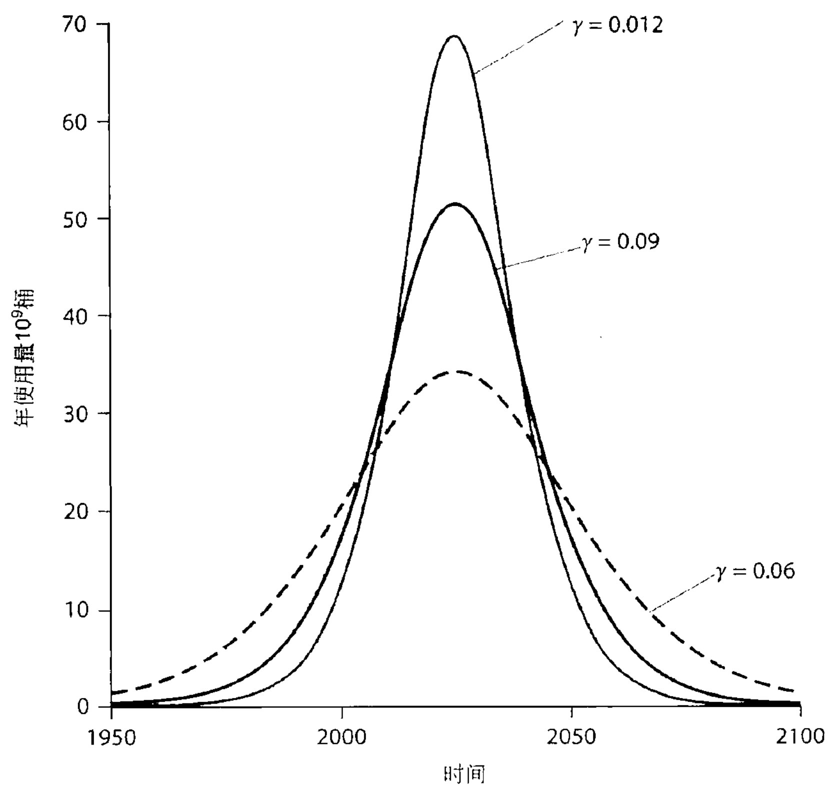



图 17.1 根据石油消费数学模型绘出的对数图像。图像取值参照了 2010 年全球石油消费量 300 亿桶的实际数据

存在。我们还划出了另外两个不同的曲线，分别是 $\gamma=0.09$ 和 $\gamma=0.06$。有趣的是，三条曲线都是把年消费量 300 亿桶的时间，放在了峰值出现之前的 10～15 年。但峰值年份的产量，是与 $\gamma$ 值成正比的。所以对最低增长率情况而言，当年的产量水平仅仅是每年 350 亿桶。这样的补偿，当然就是石油资源能够支持更长时间。

对所有的虚拟模型做一个解释：所有模型都高度依赖于每个人开始研究时的假设前提。这可以说是经济学模型的最大缺陷，有时会让我这样的物理学家为之抓狂。很多经济学模型的出发点，都是对消费和生产水平的粗略猜想，大多数参数都是手工计算，而不是来自任何严谨的数学体系。此外，对数函数图像并没有什么特异之处，很多不同形式的数学图表都可以预测出同样的结果。赫伯特的优点之一，就是完全清楚这些局限性。在他 1956 年最初发表的论文，以及 1982 年为《美国物理学杂志》编写的调查报告中，都表现出了令人惊叹的智慧。他的假设前提往往来自通用的数学原则。很多不同的曲线，整体看来都与对数曲线接近，而区别仅在于一些非常微小的细节。其他类似的示意曲线还包括误差函数曲线和贡佩尔茨曲线等。

也就是说，石油资源可能会在 10 年后出现枯竭迹象，甚至有可能更早。科威特政府最近进行的一次调查显示，石油产量巅峰甚至有可能出现在 2014 年。其他机构的一些报告，则认为是 2020 年。其后会怎样呢？看你打算听谁的意见，有人说：“没什么。”也有人说：“人类就要完蛋了。”

首先我们先来看看预言末日的理论。假设我可以挥舞魔法棒，喊一声“石油消失！”然后就毁掉了整个世界上所有的石油储量，让所有汽车油箱里的汽油全部挥发、全星球所有的油井马上枯竭。如果真的发生了这样的事，美国 99％的人都会丧命，没得商量。想想你就明白了：你日常的食物并不是自己种植的，至少没有到足够喂饱自己的地步。现在美国仅有 2％的人口是农民，而美国人食用的大部分食物都来自工业化大农场。美国人的主要粮食作物是玉米，它先是用来饲养家畜，最终变成我们餐桌上的蛋白质。对食物问题的全面论述，可以参考迈克尔·波兰的《杂食者困境》一书中的第一部分[194]。现代高产玉米根本无法手工种植。它需要工业化的生长环境，需要化肥，需要机械化采收。而且，大多数粮食还必须转运数百英里才能到达养殖场。美国人食用的大多数食物都是千里迢迢送到餐桌上的。有人估计说，每千卡热量的食物，在运输过程中都消耗了 7～10kcal 的能源，运输成本非常之高，如果便宜的运输设施突然消失，我们的食物也会随之消

失，人们就会饿死。

但是，石油资源并不会在一夜之间消失，而是在多年之后，人们对光能和植物汽油的需求会逐渐超过天然石油。到时会怎样呢？油价可能出现飞涨，人们可能会目睹石油每加仑卖到四美元以上，就像几年前真的发生过的那样。再之后的情况就不好预测了。我们目前还没有找到足以替代汽油的良好燃料来支持交通事业。并不是说不可能做到，而是迄今为止没能找到。强调消费主宰市场的经济学家们说，一旦油价明显上升，人们就会很快开发出替代产品。而整个世界也将抛弃原油，开始使用全新能源。这的确是可能的，比如说：使用费舍尔-特罗普斯工艺，就可以用煤炭为原料生产汽油，这曾让“二战”末期遭到盟军完全封锁的德国继续坚持战斗了一年以上。美国有巨大的煤炭资源储量。这不是什么良好的备用方案，因为转换过程带来的污染严重得要死。其他渠道可能还有生物燃料。节能措施可能也会发挥些作用，尽管其难度远远超过一般人的想象。问题并不在于能源总量不足，而是在交通这个特别的问题上，很难找到真正优异的汽油替代品。

关于石油危机，有史以来最优秀的短篇小说大概就是拉里·尼文的《末日将至》。该文发表于 1969 年，石油危机还没有爆发之前。它可以看作是对 20 世纪 70 年代石油危机的预警，尽管这样说有点贬低了这篇极为优秀的小说。这篇奇幻风格的故事发生于数千年前，属于典型的“剑与魔法”设定。但是，故事里的主角，一位走上战斗巫师职业路线的魔法师发现，作为魔法能量来源的“马纳”，其实是一种不可再生的资源。全世界成千上万的魔法师整天滥用魔法，已经将这种资源消耗得越来越稀少，使用魔法的难度也随之越来越大。这位魔法师发表的一段演讲深得我心：“那些剑客，那些该死的愚蠢剑客将会最终赢得世界。除非人类能够找到新的办法，让自然重新臣服于我们脚下。”还有其他几个短篇，也设定在类似的世界里，包括《当魔法消失》、短篇集《魔力归来》、长篇《烈焰之城》和《火焰塔》。关注能源枯竭后的世界的最著名电影当数《疯狂麦克斯》系列，包括《疯狂麦克斯》、《狂暴之路》、《疯狂麦克斯·穿越风暴》等，故事发生于争夺仅剩资源的一场战争以后。

不管石油资源会不会在 30 年后枯竭，它终归会有被耗尽的一天。还有，石油能支持多长时间，跟地球上有多少石油储量并不存在明显关联，因为全球能源消费呈现指数式增长。假如石油需求每 10 年翻 1 倍，20 年后就需要把产量提高到原来的 4 倍；30 年后 8 倍；100 年后 1000 倍以上；200 年后的需求量已经是最初水平的 100 万倍，而且会永远这样增长下去。打个比方说，假如我们最初估计目前的原油储量够全世界再用 30 年，可是后来发现搞错了，我们发现可用储量多了

1 倍。在使用量 10 年翻一番的情况下，新发现的资源不是能使用 30 年，而是仅能多支持 10 年。如果资源量是原来的 4 倍，也只能多支持 20 年，而不是 120 年，以此类推。在最初认定的储量增加的同时，使用年限仅能出现对数式增长（也就是增长很慢的意思）。

当然，我们没有必要太执着于用单一方法毁掉地球。全球变暖加上由哈伯特顶点所表示的燃料成本升高，彼此互动又彼此加强，可能会造成更大社会压力，实现 1＋1＞2 的破坏效果。我们生活的世界里，有一些小而且穷的国家也拥有核武器，而在过去 5 年间，印度与巴基斯坦之间爆发战争的可能性大到令人心惊胆战。上述两种因素导致的食品和燃料价格疯涨，肯定有催生战争的潜力。在核武器到处蔓延的世界上，一个国家伤害这个世界的能力，并不与它的领土面积和富庶程度成正比。而且，这个世界上石油储量最高的地区，碰巧也是政治上最不稳定的地区。

### 17.2.4　人类的生存前景

这以后会怎样？如果我们有能力熬过当前时代的动荡，地球母亲也完全有能力把我们全部解决掉。地球经历周期性气候变化，原因可能来自于自转轴向的变化。这种变化幅度并不大，但已经足够导致长达十万年的冰川时代，然后附带一段不同冰川期之间的温暖时期。我们现在就生活在两次冰川期之间的温暖时期。如果人类文明还能继续存在几千年，没有被预期中的温室效应搞死的话，将来气候会自动变冷，因为下一个冰川期即将来临。人类文明的所有成就：农业、畜牧业、著作、农村和城镇……全都是上一次冰川期结束之后才发展起来的。人类文明能够熬过下一个冰川期吗？

过去 50 年的历史已经证明，人类可以影响到地球的气候。也许到了气候自动变冷的时候，我们可以用安全的方式重新制造温室效应。冰川时代与融冰期的温度差异并不大，仅有 6℃而已。这个正是 IPCC 预言的最糟糕情况下全球变暖幅度。我们已经见识了人类让全球变暖的能力，只是不知道能不能在不带来严重损失的情况下这么做。人类是否应该大力干预地球的气候和生态系统，也是个有趣的道德议题。

熬过冰灾之后，还有一堆其他磨难等着我们去克服。冰川时代之后，地球表面的气候可能会完全乱套。此前，月球一直承担着稳定地球自转轴的工作，可是到 1 亿年以后，月球跟地球会逐渐疏远，远到了对地球自转轴起不到什么正面影

响的地步。到时候，地球会像一名醉汉一样东倒西歪。由此导致的长期气候变化可能导致所有生物灭绝。更糟糕的还在后头：太阳的亮度如今正在上升，十亿年后，太阳光照的输出功率将提升 10%。这会导致地球温室效应全面失控，表面温度变得比现在的金星还高。如果我们想不到办法应对这一系列挑战，我们的后代或许就要找一个新家，建一座新家，或者直接搬离地球。

**注：**

A. 迈克尔·曼和李·卡普合写的著作《绝望的预言：理解全球变暖》一书中，可以找到一份非常浅显易懂的 IPCC 研究成果总结。

B. 非常具体地说，这些估测数字对应的是最适合用于交通行业的“轻质原油”，也就是最适合炼制成汽油的那种类型。其他原油，比如说加拿大境内发现的油砂之类，需要经过更为复杂的工序才能炼制成汽油，成本也相对更高一些。

# 第 18 章

# 建造一颗星球

## 18.1 地球化改造

著名物理学家基普·索恩,是第一个给“萨根问题”定性的人。他认为,其本质是一个寻找物理学定律能容许的最大自由空间的问题[236]。当时索恩正在考虑的题目,是物理学原理能否容许时间旅行和超光速旅行存在。这显然是一个挑战自然科学极限的问题。在本书的最后几章,我们会集中讨论几个萨根风格的问题。每一个都比上一个更高难,以此探寻高级生命体系的极限。这些讨论都基于目前已知的物理学原理。但是,几乎所有的挑战都是目前的人类文明无法做到的,甚至有可能永远都无法做到。

这一章的标题是“建造一颗星球”,因为我们打算面对的问题就是这个。很多科幻小说,主要内容就是改建、甚至从零开始新建一个供人类居住的世界。作者们对此给出了各种各样的原因,但隐含的理由似乎永远是各种形式的“这还用问?”对这类殖民活动,总有很多出于文学和历史学角度的批评。最常见的一种,就是称其为 19 世纪欧美国家殖民活动在未来世界的投影。也许,对此类冒险更为适当的分析角度,应该是从经济学原理出发,而这个角度恰恰是很少有人采用的。

前面我们已经谈过建造太空站供人类居住的具体方法,其用途或者是供人类生活在低空轨道,或者是充当前往其他行星的休息站。这与我们本章的主题有着本质性的不同。我们现在是要“建造”一颗可以供人类居住的行星。在这个语

境下，“建造”并不是个完全合适的词。事实上，我们只是在考虑对一颗行星进行地球化改造。也就是把金星或火星这种目前不适合人类居住的星球，改造成可以供人类自由生活的空间，所以叫做“地球化改造”。我们就是在把其他星球改变成地球的样子。

首先，我们来考虑一下能够进行地球化改造的行星需要哪些入选条件。首先，我们需要一个坚实的地面作为基础，这样就排除了硕大威猛的木星、土星、天王星和海王星；其次，这颗行星不能过热或者过冷，以至于无法容许生命存在。就像第 14 章①提到过的，这取决于两个方面：一是行星到恒星之间的距离；二是其大气层厚度和组成成分。第一个方面，目前我们还没有任何能力改变。但是，我们的确可以设法改变行星表面的大气成分。从工业革命开始以来，我们就不自觉地开始了一次大气改造实验，排放的二氧化碳正在展示其含量增加 1 倍会带来何种效果。所以说，这是很好的证据，证明如果我们有能力在另外一颗星球建立规模足够大的工业中心，我们就有机会大大改变该星球的气候条件。

考虑到轨道位置，太阳系就仅剩下金星和火星两个能够被改造的对象了。除地球外，它们是太阳系最接近于生命区间的两颗行星。而且它们都有固态表面，这方面条件比外围气态巨星更理想。科幻作家们还考虑过木星等大行星的卫星作为殖民改造对象。尤其是罗伯特·海因莱因的青少年科幻作品《太空农夫》，就描写了对木星最大的卫星盖尼米得(木卫三)进行殖民的努力[111]。尽管这些卫星已经远在生命区间以外，但木星自身却可以发出一些热量，因为它受到自身重力的影响，正在不断向中心塌缩[130]。因此，木星的两颗卫星，欧罗巴(木卫二)和卡利斯托(木卫四)，在表面的冰壳下都有液态水存在。让它们成为太阳系中较为理想的生物落脚点，两颗行星最大的问题是它们质量太小，因而没有大气层(两者质量均与月球大致相当)。而更讽刺的是，它们相对较高的表面温度，反而会加快大气流失的速度。土星最大的卫星泰坦(土卫六)拥有大气层，因为土星离太阳更远，因而温度也更低。当然，科幻小说的一大特色就是不缺乏奇思妙想，阿瑟·克拉克就在《2010：太空漫游Ⅱ》中，想象有外星人在欧罗巴卫星定居。因为他们迫使木星在重力作用下进一步收缩，变成了一颗小小的恒星[57]。

我们本章的重点，是对火星进行地球化改造。这是目前看来最容易改造的行星，原因如下：

(1) 它基本处在太阳系的生命区间以内；

(2) 尽管它的表面大多数时候过于寒冷，但其公转轨道较大的偏心率，使得每

---

① 此处原文为第 2 章，有误。

个火星年至少有一段时间，其表面可以有液态水存在；

(3) 它与地球之间的距离较近，使得我们可以想象在那里建造一个多少算是永久性的居住地。

为什么不选择金星呢？金星表面巨大的气压和超高的温度，导致没有人可以在那里生活或者工作。对金星进行地球化改造的任务，要比火星难度大得多。

## 18.2 火星的基本特征

火星围绕太阳公转的轨道平均半径为 1.52AU，根据开普勒第三定律可以计算出它的公转周期：

$$T=(1.52)^{3/2}=1.88\text{ 年} \tag{18.1}$$

火星自转一周的时间为 24 小时 37 分钟，碰巧与地球的自转周期非常接近。而自转轴与公转轨道的夹角约为 24°，也跟地球(约 23.5°)非常接近。

火星与地球的性质对比见表 18.1。

表 18.1 火星与地球的性质对比

| | 地 球 | 火 星 |
|---|---|---|
| 半径 | 1 | 0.533 |
| 质量 | 1 | 0.107 |
| $V_e$/(m/s) | 11 000 | 4800 |
| $v_{rms}$—氢气($H_2$) | 3500 | 1860 |
| 氦气(He) | 2480 | 930 |
| 氧气($O_2$) | 878 | 328 |

火星的大气层中，$CO_2$ 占 95%，另有微量的氩气和其他气体，但大气层很薄。地表大气压低于地球海平面大气压的 1%。火星几乎没有自由态的氧气($O_2$)。正如我们在前文中提到过的，地球大气层中大量的氧气来自地球生物。如果不是动植物的呼吸过程持续向大气中释放氧气，地球上的氧都将以化合物形态存在。由于火星上没有生命(就算有，也非常少)，大气中也就缺少了对生命至关重要的氧气。正如一位科幻作家所说："火星大气太过于稀薄，以至于都不能说它有毒。"[1]

[1] 这段话来自格雷格·贝尔的小说《移动火星》(*Moving Mars*)。

对火星进行地球化改造的最大难题就是让火星大气中有足够的氧气，以便让生物能够呼吸。

表 18.2 中列出了火星的一些性质参数，它们对后面的探讨会有用。

火星表面水的含量未知，但肯定不像地球表面这么多。正如第 2 章中讨论过的，火星曾有一段时间拥有足够厚的大气层，以至于液态水可以在它的表面自由流淌[130]。

**表 18.2　火星的特征数据**

| 性质 | 数值 |
|---|---|
| 公转轨道距离(AU) | 1.52 |
| 公转周期(地球年) | 1.88 |
| 表面温度范围/℃ | 20(赤道，白天)到−150(两极，夜间) |
| 大气组成成分： | |
| $CO_2$/% | 95 |
| $O_2$/% | 0.13 |
| $N_2$/% | 2.7 |
| $H_2O$/% | 0.002 |
| 火星轨道太阳常数/($W/m^2$) | 560 |

## 18.3　温度与火星大气

想要让火星适合居住，就需要完成两大任务：①将其平均温度提升至水的冰点以上；②增加并维持大气中氧气的含量，到足够供人类呼吸的程度。氧气活跃的化学性质决定了如果想让氧气含量保持在足够高的水平，就必须建立可循环的生态圈呼吸系统。人们最常提出的建议，就是培养一批具备“高适应性”的细菌和植物，让它们在火星上大规模繁衍。所谓“高适应性”，是指有能力适应地球表面的各种极端环境，极热、极冷、极高压或极低压，或在其他多数动植物认为有毒的环境下生长。

只有一个办法能够提高火星表面温度，那就是提高火星大气中的温室气体含量。同样，火星也曾经有过较多的温室气体，将来也有望重新获得这些气体成分。

目前火星大气中仅有一种类型的温室气体，二氧化碳($CO_2$)；任何试图提升火星温度的努力，都应该从增加二氧化碳含量开始。那么，我们需要补充多少二氧化碳呢？这个问题很难回答，但是通过考察目前火星的温室效应水平，可以给出一个大致的答案。当前火星因为温室效应导致的气温上升幅度约为 5K[130]。如果我们假设①目前火星大气的红外线吸收能力与二氧化碳分压成正比；②它与其他温室气体的作用机制不相关；③一旦二氧化碳浓度开始提升，就不会因为其他原因减少。那么，我们就可以计算出自己需要的二氧化碳量。

下面是草算出的分析结果。我们首先从一个事实开始：气温升高的幅度并不与大气吸热能力成比例，而是跟它的 1/4 对应(参见第 14 章)。也就是说，吸热能力提升 1%，温度上升幅度为 0.25%。为简单起见，我直接假设需要把表面温度提升 80K(也就是把温室效应的效果提升 20 倍)，也就是需要把火星大气中的分压提升这个倍数的 4 倍，也就是 80 倍左右。由于目前的分压水平是 6mbar①，将来需要提升到 480mbar。

不幸的是，情况并没有那么简单。由于一种所谓的“压力扩散效应”，二氧化碳对红外线的吸收能力还依赖于整个大气的压力水平，以及大气层的垂直高度(目前，火星大气比地球大气层还要厚)。随着地表温度上升，大气层最大高度会出现下降。意思是说，在改变火星大气成分的同时，它的吸热能力会以非常复杂的形式发生变化。此外，大气总吸热能力并不简单对应于某种气体的分压，而是与其呈指数对应关系。当面对较大幅度的温度变化时，前面提出的简单模型(分压提升幅度为吸收率的 1/4)就将不再适用。但是，我们这个简单分析也没有错得太离谱。罗伯特·祖柏林和克里斯托弗·迈凯伊建造了一个非常复杂的模拟模型，得出的结果是，将气压提升至 800mbar 就可以产生足够的加热效果，使火星表面在公转的大部分时间内保持液态水存在的温度。他们的模型里考虑了火星表面风化层对二氧化碳的吸收能力[256]，风化层是指火星表层富有岩石质物质的土壤。

多数对火星进行地球化改造的计划，都是从融化火星极地的冰层开始。这些冰几乎完全是冻结的二氧化碳。在此，多数人想到的办法都是在冰层上铺上颜色较深的材料，改变其反照率，然后让阳光自动完成剩余部分的工作。例如使用煤灰，而制造煤灰的含碳材料很容易在当地找到。卡尔·萨根是第一个在 1973 年发表的论文里提出这项建议的人。他估计，人们大约需要 $10^8$ t“类似于炭黑之类能够降低反照率的材料”，这样才能造成火星极地冰层的大规模融化[208]。后来，

① 1mbar=100Pa。

罗伯特·莫尔提议，如果在火星极地引爆4颗核弹，应该能够产生足够的烟灰类物质，达到同样的目的[167]。目前还不清楚，火星极地的二氧化碳够不够把温度提升到我们想要的水平，尽管有证据表明火星历史上曾有过足够的温室气体。不幸的是，大气中含有这么多的二氧化碳就会产生毒性。事实上，10mbar以上的二氧化碳分压，就已经可以算作毒气了。因此，多数对火星进行地球化改造的计划，都把项目重点放在了其他温室气体上，比如甲烷和水蒸气。其难度在于：由于火星离太阳的距离更远，人们也就需要更大量的此类气体，才能实现与地球相类似的升温效果，项目负担非常重。尤其是火星上的水资源，几乎肯定不足以产生足够让其表面温度升高的水蒸气。

下面，我会从基础物理、化学和估算成本的角度，来考虑为火星提供可呼吸大气的任务。不过，在结束最基础部分的讨论之前，请容许我向读者介绍一些参考书。假如你想写一部同类背景的故事，可能会用到这些资料。对一颗行星进行地球化改造，是一项极为复杂的工作，马特恩·弗格的书是此类发烧友不可替代的资料来源[86]。本书恰如其分地把大部分篇幅集中在了火星身上，因为它是整个太阳系最适合被改造的对象。弗格在书中谈到的细节问题远远超过我在这里能够提及的范围，而且在他的方案中考虑到了改造遭遇反弹的效果、地理和地质条件，以及其他复杂的主题。不幸的是，他的这本书已经停印，不太容易找到了。由于过去17年我们对火星的了解程度大大加深，书中的方法也稍微有点过时。尽管如此，这本书还是能给感兴趣的读者一个理想的起点。

另外一种更复杂的利用温室气体给行星升温的方法，可以在阿里塔·唐米祖卡的论文中找到，文章题为《根据吸收光谱估测温室气体升温作用的研究》[238]。文章的主题本来是地球变暖问题，但也可以用来给火星建模。这份研究使用了一份非常复杂的数学-计算机模型，来估计大气中的辐射传导现象。还提供了一份非常详细的温室气体吸收光谱，大部分读者都很难找到这么专业的资料，祖柏林和迈凯伊提出过一个简单模型，以表面气体分压和太阳光照常数来计算火星表面温度[256]公式1。但也只能看作是一个精确度有限的粗略估计。

## 18.4 大气中的氧

对火星进行地球化改造的第二步，就是产生足够的氧气。火星大部分氧元素都被固定在土壤中，以氧化铁（$Fe_2O_3$）之类的化合物形式存在，因此让这颗行星呈

现出标志性的锈红色。为火星补充氧气，其实就是让土壤和其他地方的氧分释放出来，这个过程势必要花费很长时间。这里的主要困难在于能量，要让氧气从火星土壤中挣脱，我们需要进行下列化学反应：

$$2Fe_2O_3 + 1482J \longrightarrow 4Fe + 3O_2$$

每生产1mol氧气，我们至少要花费494J能量。另外一种达到目的的方式就是利用光合作用。如果我们能设法让某些植物在火星生存，就可以通过下列反应，从二氧化碳气中释放出氧气：

$$6CO_2 + 6H_2O + 2870kJ \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad (18.2)$$

这个公式已经在第4章进行过详细讲解，当时我们想利用这种反应来得到食物，同时提供太空站需要的氧气。光合作用需要的能源来自太阳，因而无需任何成本(尽管反应过程中需要用到水，这是火星表面非常缺乏的东西)。前面第一个反应过程，则只能通过某种工业手段实现。但有一点是毋庸置疑的：必须在某个时间节点建立起可持续的氧气生成机制，要不然新产生的氧气又会发生化学反应，重新“回到”火星的土壤里。

两个过程都需要消耗大量能源。例如，光合作用每产生1mol氧气，需要消耗的能量是$4.77\times10^5$J，而且植物还不能把照在它身上的太阳光全部转化为能量。事实上，常见的光合作用能源利用效率仅有0.05%，尽管也有些类型的植物，能够把能源利用效率提升到1%。

我们可以草算一下为火星补足可供生物呼吸的空气，需要多少能量成本。地球海平面处的大气压为$10^5$N/m$^2$，其中氧气比例为25%。假设我们为火星大气提供的最低限度的氧气浓度，约为上述水平的10%，也就是$2.5\times10^3$N/m$^2$，这就意味着为每平方米的火星土地提供600kg氧气。氧气的摩尔质量为32g/mol，或约为0.03kg/mol，结果为每平方米600kg/0.03(kg/mol)=$2\times10^4$mol氧气。

火星半径只有地球的1/3，表面积也就只有地球的1/9，或者说可以很粗略地算作$10^{13}$m$^2$，我们总共需要为其产生$2\times10^{17}$mol氧气。如果完全依靠光合作用，这意味着需要$10^{23}$J的能量成本。其实如果选用其他化学反应方法，最终的能量成本也相差不多。由于光合作用的能源利用效率很低，实际的能源成本可能要高出两个数量级，达到$10^{25}$～$10^{26}$J。目前，我们全世界的能源消耗才仅有$10^{20}$J，也就是说，为火星供氧的能源需求，相当于目前整个地球$10^5$～$10^6$年的能耗总和。在目前的技术和能源条件下，这个计划显然不现实。

为此花费的时间也非常惊人。火星轨道距离的太阳光照常数为562W/m$^2$，由于纬度影响和昼夜更替因素，我们必须把这个功率除以4，所以平均而言每平方米

火星土地从太阳得到的能量，仅相当于140W。那么来自太阳的能量总值就是$140W/m^2 \times 10^{13} m^2 \approx 10^{15} W$。因为光合作用产生氧气的能源成本为$10^{25} \sim 10^{26} J$，提供这些能量的时间将是$10^{10} \sim 10^{11} s$，也就是要花上300～3000年才能给火星提供最低水平的氧气。而且这是假设我们能使用照射到火星的全部太阳光，这个前提满足的可能性同样也值得怀疑。

上面的分析展示了能源分析法在项目可行性评测过程中的应用。这并不是对问题的详细解析，但通过对能源需求的估计，我们可以马上得出结论：火星在300年内都不可能完成地球化改造，即便我们今天就开始动工——显然，这点我们也同样做不到。我的感觉是，项目所需的时间很可能还会更长，很可能更接近于30 000年，或者说比人类有文字记载的历史长6倍。

## 18.5 经济收益

另外一个看问题的角度是考虑对火星进行地球化改造的成本。正如前面提到过的，最低能量需求是$10^{25} J$，或$3 \times 10^{18} kW \cdot h$（我假设即便所有的能源都来自阳光，我们使用能量的过程仍会产生成本）。目前的电费是每千瓦时0.1美元。如果我们假设将来的世界能源极大丰富，电费降低了三个数量级，那么电力成本将是$10^{-4}$美元/$(kW \cdot h) \times 3 \times 10^{18} kW \cdot h \approx 3 \times 10^{14}$美元。这还是大大超过目前全球GDP总和，而且还假设了能源大降价。这笔钱会在很长一段时间内花掉。我们大方一点儿，假设改造火星只需要1000年，那就是每年投资$10^{11}$美元，这个数字（每年1000亿美元）还没有赶上美国的军费支出规模，但已经超过了联邦政府在所有基础科学研究领域的投资总和。

如果我们想让私人企业投资的话，就需要考虑一个最根本的问题：对火星进行地球化改造怎么赚到钱？这我怎么可能知道？没有任何东西，我的意思是完全没有任何东西必须在火星上制造，然后运回地球卖掉还能赚钱。我们在本地生产的成本绝对要低无数倍。任何从火星运来的东西，都至少要飞过4000万mile的空无一物的宇宙空间。这其实正是绝大多数太空扩张小说的软肋：对其他行星进行地球化改造的动机，完全无法成立。例如，《太空农夫》一书中对改造盖尼米得（木卫三）的解释，是要为人口负担过重的地球提供食物。这个解释肯定不科学。而且，甚至就在这部小说里，其中一个人物还做过计算来表明在两个星球之间运输任何大宗货物的荒谬之处。当时他们争论的问题是把土壤从地球运到外星。

其实，把粮食运回去的荒谬性也完全一样。解决人口过剩压力的口实，同样也无法成立，你向外星运送人口的速度根本赶不上人口的增速。也许我们可以把外星球用作监狱，就像 18 世纪的英国人把罪犯运往澳洲海岸一样？

为什么我要强调，连阳光都需要成本，将来肯定要以某种方式付钱呢？因为有很多科幻作家，写到对一颗行星进行地球化改造的时候，都好像简单轻松得不得了：只要往外星球丢一批转基因植物，然后坐下来等它们繁殖、生长，星球上就有了可以供人类呼吸的空气。事实远没有那么简单。正如我们这一章已经谈到的，大气成分必须严格均衡地进行改造，以便在行星气候转暖的同时，制造出可以供生命呼吸的空气。即便是在地球，我们也才刚刚懂得保持气温和大气成分稳定的作用机制。的确，因为火星大气就像一张白纸一样，可以从头开始调配，这的确让问题显得比分析地球大气更为简单（或许吧）。但人们也必须从一开始就对所有方面的细节负责。这是个极为困难的任务。当然，也有一些科幻作家非常认真地对待了从零开始构建一颗星球的任务，这个就将是下一章我们要展开的问题。

# 第 19 章

# 戴森球和环形世界

因为宇宙中最有钱和最有权的那群人，总会不可避免地感觉到生活琐碎又无聊，而且会把这份责任算到自己生活的世界身上。他们中没有一个人感到真正满足：要么是午后的天气不够理想，要么是白天多出半小时显得太长，要么就是大海的粉红色调不够完美。

由此诞生了一个全新的专业奢侈品制造领域：为客户量身打造专用星球。

——道格拉斯·亚当斯 《银河系漫游指南》

## 19.1 戴森球

1960 年 6 月，《科学》杂志刊登了一篇论文，题为《人工恒星作为红外光源的研究》[71]。其作者名叫弗里曼·戴森，这位物理学家目前是普林斯顿高等研究院（就是爱因斯坦曾经工作过的同一个机构）的研究员。此前，他在我们的书中已经登场过一次，那时的角色，是"猎户座"核动力推进器的主要倡导者之一。在《科学》杂志的那篇文章中，他提出了一个不需要寻找无线电信号就可以发现外星文明的方法；他建议天文学家寻找这样一类行星：他们本身处于适合生物繁衍的温度，因而能够放射出红外线，但是它们放射红外线的功率能够跟我们的太阳相当。

对技术高度发达的种族而言，最终能够限制他们扩张的物质条件无非是材料和能源的供给。目前，我们人类能够利用的物质材料，还仅仅限于地球生物圈范围以内……在太阳系范围内，我们能够使用的物质材料上限……与木星质量相当……而能量上限，就是太阳发射出的全部能量[71]。

让我们分别考虑一下能量和资源供应的双重问题。

### 19.1.1 能源和资源要求

图19.1是公元1400年以来全球人口规模的示意图。早期数字来源于1977年的出版物，我给它添加了最新的统计数据[69]表5。

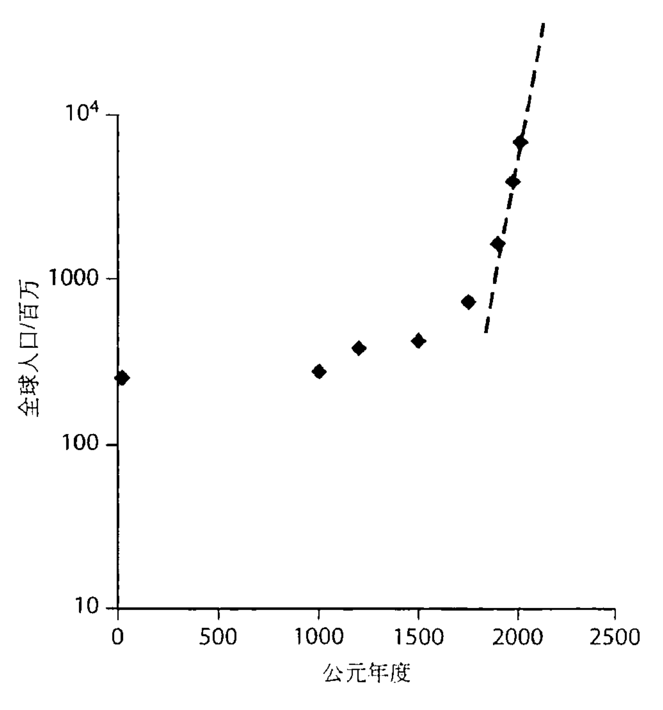



图19.1 历史上的全球人口规模

图19.1中一目了然，1800年以后到现在是全球人口急剧增长的时期。起因很可能是工业革命。同期不止是人口绝对数量猛增，人口增长率也在稳步上升。1800年至今，人口年均增长率为1.3%。这听起来并不多。但还是让我重新引入以下前文提到过的一个速算法则：任何年增长率$q$%的数字，增加1倍所需的年数都是$70/q$。也就是说，按照1.3%的年均增长率，全球人口54年就可以增加1倍。

假设我们银河系有 100 000 个可以居住的星球，而我们人类找到了可行的方法，可以把过剩的人口送到这些星球，那么只需要大约 900 年，就可以让每一座星球都拥有现在地球这么多的人口。

如果我们认为超光速旅行不可能实现，那么上面的星际移民计划肯定也不现实。想要到达那些行星，路上花费的时间都不止 900 年。而且，送那么多人离开地球的话，能量成本可能也会无法满足。在 1961 年的一篇论文中，弗里曼・戴森考虑了指数式增长的人口数量和能源需求。他给自己提出的问题是：在无法实现星际旅行的情况下，如何解决地球的人口问题。

## 19.2 戴森网

戴森考虑的方案，是在地球到太阳距离的环太阳轨道上，建立数量众多的太空站。他设想的这个解决方案，直接取材于科幻小说。在访谈和自己的著作中，他声称这个创意来自奥拉夫・斯塔普尔顿的小说《造星主》。小说中一些生活在银河系中心地带的文明，围绕他们的恒星建造起巨大的壳状结构，以获取它们垂死的恒星发出的最后的光芒[225]。戴森设想的太空站，将覆盖太阳周围以 1AU 为半径球面上的大部分空间，以便截获太阳发出的大部分光线。这里应该强调一下，这一系列太空站并不是“戴森球”，戴森球应该是一个固体的壳状结构，将太阳完全包裹起来，能够吸取太阳发射出的全部能量。我将把前面提到的很多太空站组成的结构称为“戴森网”，以便区别于戴森球。戴森球存在两个问题：

（1）牛顿的壳层定理告诉我们，像戴森球这样一个完全无缝的球状壳，所受的离心力与万有引力达到平衡。也就是说，你没有任何办法阻止戴森球的重心向一侧漂移，并撞到太阳。拉里・尼文提出的环形世界面临的问题更为严重，下文我们将会讲到。

（2）虽然两者之间的合力为零，但球体的每一个部分还是会受到巨大的拉伸力，影响到球体上的每一个部分。这份作用力的强度超过了任何已知材料能耐受的限度。我们还是将这个问题留到后面，跟环形世界一起讨论。

在环绕太阳的轨道上修建彼此独立的大型空间站，则不会面临上述问题。每座空间站都在环绕太阳的轨道上，也就是说离心力与来自太阳的引力取得平衡，比较麻烦的问题是要让数十万围绕太阳的空间站不要彼此碰撞在一起。

建造这一层空间站需要的材料规模异常巨大。正如戴森指出的，如果我们把

取材范围限定在太阳系以内,那么大多数质量(除了太阳之外)都集中在巨大的木星身上。木星的质量超过太阳系所有其他行星的总和。其质量高达 $1.9\times10^{27}$ kg,大约相当于地球质量的318倍。木星加上土星,我们能够搜刮到的材料质量可能会达到 $2.5\times10^{27}$ kg。这看起来很多,但如果平铺在太阳周围半径1AU的球面上,再假设物料的平均密度与水相当,那么我们能得到的厚度将只有9m。不过,这已经超过了我们的最低要求。

### 19.2.1 宇宙空间中的巨大建筑

在较近的1996年发表的论文中,戴森考虑了为戴森网建设大型空间站的工程学问题[74]。他在这篇论文中主要考虑了三个方面的因素:

(1) 在宇宙空间中建造大型建筑物是否可能实现?

(2) 在宇宙空间中能否建造轻质刚体建筑?

(3) 是否可能将行星拆解开来,用作建造这些建筑的材料来源?

在宇宙空间中建造大型建筑的主要困难,与在行星表面完全不同。限制太空站规模的决定性因素是引潮力。在一定意义上,我们考虑建造太空电梯的时候,就已经面对过这个问题,尽管那座建筑是另外一个方向的极端案例。

如果我们考虑一座围绕恒星或者行星旋转的太空站,那么整个太空站上只有一个点,也就是它的质心能够实现引力与离心力的完全平衡。太空站上位于质心"内侧"的点,距离其旋转目标更近,受到的引力略大于离心力;而太空站上位于质心"外侧"的点,距离其旋转目标更远,受到的引力略小于离心力。这也就意味着,好像存在着一股力量,要把整个太空站扯成两半。这就是所谓的引潮力。我第一次听说这个概念,是在阅读拉里·尼文的短篇小说《中子星》的过程中。故事中的主角驾驶飞船时过于靠近小说中的中子星,他本人差点儿被引潮力扯成两半[176]。

一个大小为 $L$ 的结构,沿半径为 $r$ 的轨道围绕质量为 $M$ 的目标旋转时,将其扯开的力量大小级别是:

$$T\approx\frac{GMm}{r^3}L\approx(gm)\times\frac{L}{r} \tag{19.1}$$

其中 $g=GM/r^2$ 是旋转核心引力导致的加速度,$m$ 是空间站的质量,本式只是一个估计值。实际拉伸力的数字与飞船形状和质量分布情况有关。如果空间站密度为 $\rho$,那么 $m\approx\rho L^3$,代入后求解,可得知

$$L_{\max}\approx\left(\frac{Y_{\max}r}{\rho g}\right)^{1/2}=(hr)^{1/2} \tag{19.2}$$

其中 $Y_{max}$ 是飞船结构能够承受的最大拉伸力；$h$ 的定义与第 5 章中太空电梯所设的相同，是指具备一定的拉力/重量比的特定材料在重力影响下，能够不被自身重量扯断的最大长度。这里与第 5 章的最大区别是，引力因素主要受自太阳的影响，而不是地球。在式(19.2)中代入钢铁材料对应的属性值，计算出最大尺寸是 $9\times10^8$ m，或接近 $10^6$ km，这也是戴森在他的论文中得出的计算结果。[A] 这个结构的面积，大约比地球大 150 倍。换个方式的话，你可以说这东西的范围比地球到月球的距离还要大。尽管这已经很大，但如果用上碳纳米管材料，凭借它高达 1000 倍以上的拉力/质量比，甚至还能建造 30 倍以上的太空结构。

从地球到太阳的距离是 $1.5\times10^{11}$ m。如果我们想要建造足够的太空建筑，以阻断所有太阳光，那么我们需要的数量是

$$N \approx 4\pi(r/L)^2 \approx 3\times10^5$$

### 19.2.2 建造轻质刚体建筑

戴森论文中的下一个问题，是能否使用尽可能少的材料，建造轻质刚体建筑。对各部位密度不变的建筑物而言，其质量与大小成正比：

$$M \sim L^3$$

因为质量与大小的立方成正比，所以在我们兴建大型建筑时，其质量会迅速上升。戴森考虑的方案，是我们目前所说的“分形”建筑，或者也叫局部对称结构。他的方案是用八边形部件组成八面体结构，这些八面体再进一步组成更大的八面体，以此类推。由于建筑结构精巧，在轨道中又无需支持自重，人们可以用这种方式建造非常巨大又极为轻巧的建筑。细节可以参看戴森的原文[70]。戴森估计，这样建造一个进深 $10^6$ km 的空间结构，需要的材料质量约为 $3\times10^{14}$ kg，或者说 $5\times10^{-11}M_E$。

由于太空建筑采用了分形结构，质量与尺寸的对应关系降低了一个数量级

$$M \sim L^{3/2}$$

意思是说，随着空间站面积的扩大，整体的密度有所下降。要建成一座戴森球，就需要 $10^5$ 座上面提到的大型太空站，总质量约 $10^{20}$ kg。

这个质量数值依然非常可观，帝国大厦的总质量才不过 $4\times10^8$ kg，戴森网相当于把大约 1 万亿座帝国大厦送入太空。这个质量数值，已经超过了全球任何地方所有城市建筑的质量之和。

### 19.2.3　如何拆解行星

建成一座戴森网所需的质量尽管少于地球的质量，但仍称得上非常可观。我们能想象拆掉地球或者破坏任何一颗其他行星，以获取材料建成它吗？

首先第一个要问的问题是，想拆毁一颗行星，需要花费多少能源。均匀球体的重力势能是：

$$U=-\frac{3}{5}\frac{GM_p^2}{R_p} \tag{19.3}$$

行星并不是表面平滑的均匀球体，不过我们暂时先把这个当作计算的起点。在这个公式中，$M_p$是行星的质量，而$R_p$是行星半径。把地球的相应参数代入，得到$U=-3.8\times10^{31}$ J。用地球为标准单位，我们可以写出（适合任何行星）的公式

$$U=-3.8\times10^{31}\times\frac{M^2}{R} \tag{19.4}$$

其中$M$的单位是行星质量相对于地球的倍数，$R$是其半径相对于地球半径的倍数。要拆开一颗行星，就至少要提供这么大规模的能量。太阳的亮度是$3.86\times10^{26}$ J/s，拆毁地球所需的能量，相当于太阳在一天内放射出的总能量。

下面一个问题，就是你该怎样拆解一颗行星？戴森提出了一个独创性的设想，就是让行星自转加速，直到它分崩离析。（以拆掉地球为例，）他的建议是把地球变成一台电动机，沿着纬线方向铺设很多条平行线缆，将其通电，让地球获得一个强大的电磁场。然后，让电流从一个极地流向另一个极地，令其传导到距离地球很远的地方，然后再传回来。以此为地球提供强大的扭动力，既可以让地球加速自转，也可以使其减速。戴森预计这个项目会花掉40 000年时间，所需功率约相当于地球从太阳获得的光照功率的300倍。

在格雷格·贝尔小说《上帝的熔炉》中，敌对的外星人势力用更快的方法毁掉了地球。他们把两块密度超大的物体投入了地心。其中一块是普通物质，另一块是反物质。两者都达到了中子态密度。等到两块物质融合在一起，因此发生的爆炸就毁掉了整个地球[32]。根据上面的计算和$E=Mc^2$公式，完成上述过程所需的质量是$10^{14}$ kg。贝尔方法的目的在于破坏，而不是建设，不过最终效果是一样的：我们把行星拆成了碎片。

### 19.2.4 如何发现戴森网

戴森声称，他之所以要写这些论文，目的并不是建议人类开始建造这种建筑，他的原话是这样写的：

> 当谈到规模如此巨大的工程时，我们一方面可以想象未来的人类将怎样去做；另一方面，也可以猜测外星人，假如他们存在并且足够先进的话，可能会以怎样的方式完成这类设想。现在就要给人类规划无比灿烂辉煌的未来……可以算作是痴人说梦……但是，通过严格论证此类设想，而据此调整进行天文观测的方式，却是严肃而且合理的科学研究[74]。

他想要知道，如果外星世界存在这类的天体结构，天文学家能否发现它们。观测的难点在于：像我们的太阳这样的恒星，其能量释放模式遵循黑体曲线，特征温度约为 6000K。这意味着其光谱峰值在 0.5$\mu$m（或 $5\times10^{-7}$ m）的波段。但是，戴森网的平均温度却要比太阳低得多，仅有 300K 左右。那层外壳会吸收温度相对较高的阳光，然后在较低温度辐射掉这部分能量。天文学家会看到一个波长峰值出现在 10$\mu$m（或 $10^{-5}$ m）的黑体。太空中存在一些原始波长就在这个范围的天体。戴森网与其他天体的不同，就是其发光功率与我们的太阳相当，温度却是常见行星的水平。事实上，人们也可以说，如果某个外星文明没能完全遮挡它们的“太阳”光，天文学家看到的或许会是两个强度大致相当的黑体曲线，一个来自没有被完全遮蔽的恒星，它是一个高温光源；另一个来自温度低很多的球壳。这看上去像是一个合理而且独特的光谱特征。我说“合理”，是因为你不太可能完全遮蔽一颗恒星的全部光芒。戴森网并不是一个致密的壳，而只是相对较小的太空站，分布在球壳状的轨道上。为了避免这些“卫星”互相碰撞，各太空站之间势必要保留一些空隙。要发现戴森网，我们需要寻找的是这样一颗恒星：它发出的大部分光线都在可见光范围，但也有相对较大的一部分（10%～50%）在波长相差很多的红外线波段。我自己想象不出有什么自然存在的天体具备这样的光谱特征，不过，如果有一些这样的天体，那也完全正常。

## 19.3 尼文的环形世界

建造戴森球的困难显而易见，它需要的能量数量巨大；为了建成它，还需要毁灭其他星球等。1970 年，拉里·尼文在他的小说《环形世界》中，推出了一个规模

略小一些的太空世界。正如它的名字所显示的,环形世界是一个环绕恒星的圆环,半径为 1AU,宽度不详。尼文决定让他的环形世界转动起来,以便给上面的居民提供(用离心力模拟的)重力效果。

我在这个部分的写作计划,就是扮演一名“环形世界工程师”,也就是说,回顾拉里·尼文最初设计这个世界时(很可能)经历过的思路。这是个很有趣的思维训练,而且它的设计哲学体现了硬科幻最为迷人的一面。当然,我们的任务难度要比尼文小得多,我们只需要照搬他的思路,而不需要去做原创性的探索。另外一点:在推理过程中,我刻意避免使用小说中出现过的参数,而是根据自己的物理和天文学知识估计它们的取值范围。最后再与书中出现的数字做比较。

### 19.3.1 环形世界的质量

首先,我们来估计一下它的质量。它被认为大于一颗行星,而小于一颗恒星。与戴森网不同的是,它是一个致密结构。怪异的是,它的质量会比戴森网还要大。

既然它比行星大,又比恒星小,或许我们可以取地球和太阳质量的几何平均值作为它的质量。由于地球质量约为太阳的十万分之一,那么两者的几何平均值就是太阳质量的 1/1000,或者地球质量的 1000 倍,折合约 $6\times10^{27}$ kg。另外一个估计其质量的方法,就是估计其建造原材料从何而来。如果我们假设建设者仅从一个恒星系统中取材,那么就可以把环形世界的质量估计成整个太阳系除去太阳之后的质量总和。正如前文我已经说过的,除了太阳之外,太阳系大部分质量都集中在木星身上,木星与土星的总重约为地球质量($M_E$)的 390 倍。这个跟另一种方法做出的估计相差不远。当然,天文学家们在其他星系发现过“超巨行星”,其质量超过木星的 10 倍。那么我们就有很好的理由相信,我可以把环形世界的质量调高两个数量级,甚至更多。为了后面的计算更简单,我将使用 $5\times10^{27}$ kg 这个估计值。

### 19.3.2 环形世界的半径及温度

环形世界最重要的参数之一是它的半径,约等于到太阳之间的距离。由于环形世界的居民主要是人类和晋提人这样的类人外星生物,那么它到恒星的距离,理应大致等于地球到太阳的距离。要不然,从恒星照射来的光线就会使其表面过

热或者过冷。据此，其半径 $R\approx1\mathrm{AU}=1.5\times10^{11}\,\mathrm{m}$。这里有一个小陷阱，有了这个距离之后，人们就容易天真地以为，环形世界表面的温度会与地球大致相当。这就忽视了地球表面温室气体的影响，它们使地表温度上升了 30℃左右。“那又怎样?”我听见有粉丝提意见了。“咱环形世界也有大气，成分跟地球一样一样的，也能给环形世界提供温室效应。”是的，但区别在于，地球表面的温室气体把整个星球完全包裹了起来，而环形世界的大气只存在于内侧。要计算环形世界的温度，就需要详细掌握各方面的平衡，注意到有一部分热量是从环形世界的背面(外侧)流失的。让我们用细节平衡的方法，来计算一下环形世界的平均温度吧。

计算这里的平均温度的方法，本质上跟计算行星平均温度的原理一样。整个环形结构接收到一部分光照，强度为某个平均值，有赖于恒星本身的光照强度和平均反照率。部分能量会以红外线方式散失，而其中一部分红外线又会被温室气体拦截，导致平均温度有所上升。这里有两个复杂之处：首先，一半的辐射来自环形世界背面，因而是不受温室气体影响的；在其他因素不变的情况下，这会导致环形世界温度下降。其次，昼夜更替和纬度区别，使得行星获取光照的功率仅能实现单位面积最大光照强度的 1/4。而环形世界控制阳光照射时间的机制，是安排了一些“阴影块”围绕在太阳周围，以便给这里的居民提供昼夜更替。建造环形世界的神奇工程师们，会给阴影块选定合适的形状和间隔，以便确保合适的温度。我们姑且假设为 288K，跟地球表面相等。(尽管地球调整温度的方式是改变温室气体浓度)用一点儿代数学就可以得知：

$$T_{\mathrm{RW}}=\left[\frac{\eta F}{\sigma(2-f/2)}\right]^{1/4}\qquad(19.5)$$

在这个表达式中，$T_{\mathrm{RW}}$ 代表环形世界的平均温度，$F$ 是来自“太阳”的平均光照强度(假设为 $1000\,\mathrm{W/m^2}$)，$\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数($5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/m^2K^4}$)，$f$ 是发射出的红外线被温室气体再吸收的比例(我们建造的地球模型中，此项数字为 0.77)。$\eta$ 是环形世界的光照时间比例，这个是我们能够自由调整的参数。环形世界的建筑材料，也算是另外一种品牌的神秘物质了，它被称作“斯克里斯”。我假设它能够完全吸收投射到表面的光线，也就是反照率为零。用上面的公式多玩儿几轮数据测试，得到的结果是：如果想让 $T_{\mathrm{RW}}=288\mathrm{K}$，那么应该采用 $\eta=0.65$。也就是这样设定我们的“阴影块”，让环形世界 65%的时间被阳光照耀，35%的时间隐藏在黑暗中。

### 19.3.3 模拟"重力"与转速

由于整个环形世界的厚度非常小，其重力场将完全不足以让任何事物停留在它的表面上。因此，拉里・尼文设想：它应该有足够快的转速，以便因此产生的离心力可以起到重力的作用，就像旋转的太空站一样。由此，再加上表面"重力加速度"与地球相当($g\approx10\text{m/s}^2$)这个线索，我们能够算出它的转速：

$$v=\sqrt{gR}=\sqrt{10\text{m/s}^2\times1.5\times10^{11}\text{m}}=1.22\times10^6\text{m/s} \quad (19.6)$$

这个数字是地球公转速度的 40 倍；这意味着，整个结构具备的动能极为巨大。

$$K=\frac{1}{2}mv^2=3.65\times10^{39}\text{J} \quad (19.7)$$

请特别留意这个数字。

我们随便猜一下，斯克里斯材料的密度是常见固体的水准，大约 $5000\text{kg/m}^3$，那么整个环形世界的体积就将是 $10^{24}\text{m}^3$。我们可以把环形世界看作一个薄薄的圆环，半径是 $R$，厚度是 $T$，宽度是 $W$，其体积可以用下列公式表示：

$$V=2\pi RWT \quad (19.8)$$

其中只有 $R$ 这个变量是从一开始就确定了的。为了让类地球的生物繁盛(假设恒星各方面属性与太阳相近)，$R\approx1\text{AU}=1.5\times10^{11}\text{m}$。由于环形世界诞生的初衷就是解决人口过剩问题。其内侧表层面积就要尽可能越大越好，也就是说，我们要让宽度 $W$ 的值尽可能最大。作为一个大胆的猜想，我会假设宽度是半径和厚度值的几何平均值(这跟猜想质量同一个方法)：

$$W=\sqrt{RT}$$

从这个猜想出发，再代入公式(19.8)，我们就可以得出一个求厚度的式子：

$$T=\left(\frac{V}{2\pi R^{3/2}}\right)^{2/3}=19.6\text{km} \quad (19.9)$$

这样得出的结果是宽度 $W=5400\text{km}$，接近于地球直径的一半。环形世界的表面积就是：

$$A=2\pi WR=5.1\times10^{19}\text{m}^2$$

或者说大约相当于地球表面积的 $10^5$ 倍。翻阅一下尼文的小说，他设置的宽度是 100 万 mile，或者说 $1.6\times10^6\text{km}$，意味着表面积为 $1.5\times10^{21}\text{m}^2$，这就相当于地球表面积的 300 万倍之多。不过，这样一来，环形世界的厚度就只有 700m 左右了。

### 19.3.4 环形结构的强度

拉里·尼文曾有一次在文章里说：环形世界大致可以看成是一座没有终点的斜拉索桥[180]。

这个说法值得我们细细研究一下。首先，就像斜拉索桥上的线缆一样，环形世界的整个结构都靠拉伸力支撑。这是因为它整体转速太快，以至于因旋转产生的离心力大大超过了恒星引力。行星的状况与之不同，它们轨道的位置就是由离心力和引力的平衡点决定的，所以（除了引潮力之外）都不需要担心这类受力情况。从旋转方向所在的平面来看，施加在环形世界上的离心力把它向外推，而系统内各区段之间的拉力形成的向内合力与之抵消。图 19.2 演示了这里的受力情况分析。圆周单位距离上拉伸力形成的合力，是结构内拉伸力的两倍乘以这段圆周线的曲率（即 $1/2R$）。

$$\rho TW g_{\text{eff}} = \frac{\tau}{2R} \tag{19.10}$$

或者

$$\tau = 2g_{\text{eff}}\rho TWR = Mg_{\text{eff}}/\pi = 1.6\times 10^{28}\,\text{N}$$

这里的 $g_{\text{eff}}$ 是环形世界表面的模拟重力加速度数值（$=v^2/R$），取值被我们假定为 $10\text{m/s}^2$，$M$ 是总质量，$\rho$ 是斯克里斯的密度。这个问题还有一个很好地解读：环形系统内的拉伸力强度，等于离心力总值除以 π。系统内的张力，就是每单位截面积承受的拉力，这也很容易计算出来：

$$\sigma = 2g_{\text{eff}}\rho R = 1.5\times 10^{16}\,\text{N/m}^2$$



图 19.2　环形世界系统内的结构张力

环形结构内部的拉伸力,比太空电梯内部还要高大约五个数量级,其实就连空间电梯目前也没有任何足够强韧的材料来建造。坏消息之后的小安慰是:拉伸力与环形结构的厚度无关,意思是实际上我们可以把环形世界建得非常薄,爱多薄就多薄。不过,还是要注意一点:环形世界的体积模量一定要比拉伸力大一个数量级以上,否则环形世界就会开始明显变形。意味着体积模数至少要达到 $Y=10^{17}\,\mathrm{N/m^2}$。不过,环形世界里声音的速度(压力波传送的速度),可以用下列公式计算:

$$v_s=\sqrt{Y/\rho}=\sqrt{10^{17}(\mathrm{N/m^2})/5000(\mathrm{kg/m^3})}\approx 5\times 10^6\,\mathrm{m/s} \tag{19.11}$$

达到了惊人的1.5%光速!

斯克里斯这种材料,几乎肯定是不可能存在。通常的物质都是由静电作用力连接在一起后结构强度能够达到的最大值,就是每单位质量中隐含能量的乘积,也就是 $10^{12}\,\mathrm{N/m^2}$,这使得太空电梯还算属于可能世界的边缘,但环形世界就几乎不可能存在了。跟虫洞超光速旅行需要的"捆仙绳金属"相比,斯克里斯也还不算太极端,但也已经相距不远。$h$ 参数(假设其密度为 $5000\,\mathrm{kg/m^3}$),需要达到 $2\times 10^{12}\,\mathrm{m}$,或者说1/1000光年。斯克里斯还没有到捆仙绳金属那么难找的程度,但肯定也不容易发现。

## 19.3.5 能量因素

假设环形世界有可能建成,那么又需要多长时间才能完工呢?这个问题可不容易回答:这东西超出人类能够胜任的工作太多,对有可能完成这种空间结构的社会,我们必须作出太多毫无根据的假设,以至于……我都不知道下面该说什么了。不过,也许我们可以从能源需求角度分析,然后给出一个工期下限。

我们已经计算过整个环形世界的能量:$3.65\times 10^{39}\,\mathrm{J}$。建成环形世界的文明体系,将不得不设法获取能源以让它获得这么多的能量。最方便获取的能量,当然来自环形世界所围绕的恒星。如果这颗恒星与太阳类似,照射功率约为 $3.6\times 10^{26}\,\mathrm{W}$,再假设这种超级文明能够获取来自恒星的全部能量,也需要大约 $10^{13}\,\mathrm{s}$,也就是300 000年,才能从恒星获得这么多的能量。但是,假设100%使用恒星能量的前提,可能性还是不大,如果使用率是10%的话,那么需要的年数就将是三百万年。

还有什么其他办法产生这些能量吗?嗯,爱因斯坦先生告诉我们,质量中蕴含的能量是 $E=Mc^2$,如果我们将一些物质中的能量全部榨干,用于启动我们的环形世界。那么能量总需求 $3.6\times 10^{39}\,\mathrm{J}/(3\times 10^8\,\mathrm{m/s^2})^2=4\times 10^{22}\,\mathrm{kg}$。这与月球的质量($7.35\times 10^{22}\,\mathrm{kg}$)相差不多。但是,你终归还是要找到提取这些能量的办法,整

天念叨反物质是没有用的，因为前面我们讲过了，制造反物质也需要消耗能量。如果环形世界工程师手头没有一颗由反物质组成的月球（没准儿他们真有，在尼文的《已知空间》系列小说中，贝尔武夫·谢菲尔就曾经考察过这么一个对象），那他们就得想想别的办法来提取能量。唯一听起来合理的做法，是把这颗卫星投进一个快速旋转的黑洞中。这样可以提取出最多 50% 比例的能量（后面会详细解释）。这次，还是只能到故事里找帮手，见多识广的谢菲尔先生还曾遇见过一名“太空海盗”，他的绝招是用微型黑洞吞噬别人的星舰。当然，这个黑洞还是要有足够的尺寸，至少保证它不会因为霍金辐射过程而蒸发掉。但是，这个问题也会在后面详谈。

## 19.4 环形世界、全球卫星定位和爱伦菲斯特悖论

环形世界的魅力之一，是它活生生地体现了爱因斯坦相对论中一个最令人费解的特色，这是 1909 年由物理学家爱伦菲斯特提出的。内容很简单：想象一下，环形世界故事前三部的主角路易斯·吴坐在一艘宇宙飞船里，直接悬浮在环形世界所围绕的恒星上空。我们还是假设环形世界是一个半径 1AU 的正圆形，圆心就是这颗恒星。如果它静止不动，那么它的周长就是 $2\pi$AU。但是由于它是移动的，那么按照相对论的解释，它的长度就会沿着运动方向被压缩。因此，周长就将小于半径的 $2\pi$ 倍。

其影响程度并不大。即便环形世界的转速可以高达 1200km/s，变形比率也才仅有十万分之一，但是环形世界本身却非常巨大，在此情况下“被消失”的部分，面积相当于半个地球！换句话描述这个问题：相对论对环形世界造成的影响，超过地球自转影响的十万倍！而地球自转造成的影响，就已经能被原子钟测得。事实上，由于相对论修正值非常巨大，你很难给环形世界设计一个 GPS 卫星定位系统。

爱伦菲斯特悖论是出了名的难以处理。有人可能会说，从某参考系来看，环形世界的周长甚至应该大于 $2\pi$AU。也有人说，由于吴先生自己处在静止参考系，他所看到的周长应该等于 $2\pi$AU。但是，让我们想一想，如果有个环形世界里的人想要测量大圆环周长，结果会怎样？假设晋提人基米，吴先生的一位朋友，拥有一大批长度正好是 1m 的尺子，他打算把这些尺子一根接一根摆放在地上，以此测量环形世界的周长。从路易斯·吴的角度看，每根尺子都在运动方向上缩短了。所以，此时测量环形世界的周长，比静态时进行测量需要更多的尺子，基米测量的结

果就成了大于 $2\pi R$！

多数有关相对论的书籍，都会简单提一下爱伦菲斯特悖论，最主要的原因就是它没有一个确定无疑的解释。讲述这个问题比较详尽的，是亨利·阿泽利斯的《相对论力学分析》[28]204~243。书中有一整章的篇幅专门处理这个悖论。阿泽利斯的结论是：如果不求助于广义相对论，这个问题就得不到完满的答复。这是可以理解的，广义相对论就是关于时空扭曲的理论，其中允许非欧氏几何的形状出现，而其中的圆周与半径的比值，也可以不等于 $2\pi$。阿泽利斯认为：人们必须搞清楚环形世界的物质属性，然后把数字代入爱因斯坦的力场方程，再讨论随后出现的运动和变形情况。

多数作者并不赞同阿泽利斯的结论，尽管他们的分歧主要是解读层次上的，而不是事实层面的。大家的共识似乎是初始条件对这个问题非常重要。你让圆环开始运动的方式，会决定它的几何形状。不过，这个问题非常令人着迷，而且还远没有获得解决。当然，见证一个真正以相对论性速度旋转的环形世界，会是一劳永逸解决这个问题的最佳方法。

## 19.5　环形世界不稳定！

哦，环形世界它不稳定
不稳定啊不稳定
可是作者他一直在努力
这让我感觉很满意

——科幻小说界的传统民歌

最初一部小说《环形世界》发表之后不久，拉里·尼文到麻省理工学院演讲的时候，就遭遇了大学生集体合唱事件。“环形世界它不稳定！”这句话的意思是，如果置之不理，环形世界很快就会失去平衡，很短时间之内就会撞上恒星。这里的“很短时间”，我指的是人类时间维度上的短时间，而不是天文学意义上的。这个过程最多需要几年。这种不稳定性催生了第二部小说《环形世界工程师》，因为尼文不得不找一个解决方案。

有趣的是，尽管科幻圈儿里貌似人人都知道环形世界不稳定，却找不到对其原因的完整解释。拉里·尼文曾在一篇文章中提到：他的朋友丹·埃尔德森，帕

萨迪纳喷气推进实验室的一位科学家，曾花了两年时间认真探讨环形世界不稳定的根源。不幸的是，据我所知，后者并没有发表过他的研究成果。此前至少出现过两篇别人所写的论文，讨论了环形世界的不稳定问题，但却难以让人信服。这些文章当然也没有犯什么明显的逻辑错误，但却把问题过度简单化了，忽视了一个乃至多个环形世界的复杂之处。这个问题至少涉及三个方面：静态稳定性、动态稳定性、整个结构的解体倾向。

开始我的分析之前，我想强调三件事：第一，我在整个分析过程中都始终假定，拉里・尼文和已故的丹・埃尔德森都是非常聪明的人士，至少不比我笨。而且，我也的确无法抽出两年时间来细细重演后者的分析过程。但是，既然有人已经做过，别人再模仿就不会太难，而我应该也还不是太笨（自以为吧……），应该能把相关要点重演一遍。第二，我这是站在巨人肩膀上的分析。作为此后内容基础的那篇论文，来自另一位伟大的物理学家詹姆斯・克拉克・麦克斯韦①，他在文章中详细论述了土星环的稳定性[161]。麦克斯韦的论文堪称学界力作，他用理性分析证明土星环绝不可能是单一固体或者液体，而只能是由细小的碎块组成，它的论文奠定了当今时代对稳定力场进行数学分析的基础。这篇论文对完全理解环形世界不稳定性的意义也非比寻常，尽管我们要把他的研究方法修改一下，以适应我们眼前的问题，后面我将详细解释这背后的原因。最后，此类分析涉及的数学方法，已经大大超出了本书范围，因而我只会做一般性的分析和文字描述。还有，这里关于不稳定性的讨论，仅限于同一平面范围内，也就是环形世界与它环绕的恒星所在平面中的运动。偏离这个平面的运动，我们将完全不考虑。

### 19.5.1 静态不稳定性

这个是前人论文中已经谈及过的问题。假设恒星位于环形世界的圆心，那么两者之间的作用力为零，因为太阳对一个部分的吸引力，会被相反方向的引力完全抵消。但是，如果环形世界稍微偏离了圆心，或者出现了一点点上下颠簸或转向扭曲，结果会怎样呢？如果它倾向于回复原来的位置，那么这个系统就是稳定的。因为系统面对小干扰时，有能力进行自我修正。但是，如果它倾向于进一步偏离中心，那么它就是不稳定的，而圆环也最终会因为撞到了恒星而被毁。

---

① 詹姆斯・克拉克・麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831—1879），苏格兰数学物理学家。其最大功绩是提出了将电、磁、光统归为电磁场中现象的麦克斯韦方程组。

科林·麦克因斯针对这个问题做过稳定性分析[162]。它发现,环形世界在面临平面运动时不稳定。也就是说,如果环形世界偏向一边,引力作用就会倾向于将偏离幅度放大,而不是自动修复,回到中央位置。相关的分析思路很简单,但涉及的数学知识中有超几何函数,所以我们就不在这里解释了。不过,偏离平面的运动是稳定的。也就是说,如果环形向上偏离或者向下偏离,系统有能力自动进行修正。

这并不令人吃惊。仅靠万有引力的作用,没有任何静态质量分布可以保持完美平衡。这是所谓"恩肖定理"影响的结果。基础较好的读者,可以参照 W. 琼斯于 1980 年发表的论文[133],进一步了解相关细节。围绕恒星公转的行星处于动态平衡状态时万有引力与离心力保持平衡。这就是我认为环形世界平衡性远不是一个静态问题的原因。行星可以在运动中保持平衡,直至数十亿年的时间。那么为什么环形世界就不可以实现这样的动态平衡呢?

### 19.5.2 动态不平衡

环状固体系统的平衡性问题已经被讨论了大约 10 年。但最终的研讨对象,却并不是人造固体结构。那时人们所困惑的问题,是土星环的组成成分,它到底应该是固态?是液态?还是由很多围绕土星旋转的较小个体组成的呢?

在"旅行者二号"卫星飞越土星之前,我们从来没有看到过土星环的细节照片。但人类早就知道,土星环不可能是一块完整的固体,这要归功于詹姆斯·克拉克·麦克斯韦所做的分析。他也是人类历史上最伟大的物理学家之一。如今,麦克斯韦最广为人知的成就,是总结出了全套的电磁场方程。但实际上,他对物理学的所有分支都做出过贡献。他在 1856 年发表了一篇论文,讨论土星环的稳定性,并涉及它的运动方式[161]。他的分析表明,如果土星环是固体,在其旋转运动中就不可能保持行星那样的稳定状态,而势必会偏离中心,撞上土星。因为实际上没有发生这样的结果,所以麦克斯韦断定,土星环必定是由一些细小的碎片状物体组成的,它们分别沿着各自的轨道围绕土星旋转。他还考虑了这些碎块有没有处于液态的可能,答案同样是否定的。

稳定态问题非常复杂。要开始讲解,首先就要考虑为什么行星围绕太阳公转的轨道能保持稳定。围绕恒星公转的行星。看上去受到两种作用力的影响:一个是将其向中心牵引的恒星引力,另一个是将其向外推的"离心力"。对正圆形轨道而言,两种作用力在任何时候都处在平衡状态。而对于椭圆形轨道而言,随着行星向恒星逐渐接近,离心力也会渐渐增强,从而使它渐渐远离恒星;等行星到恒星

的距离超过平均数，引力开始超过离心力。结果是行星净受力方向指向恒星……最终的结果，就是椭圆形的行星轨道保持稳定：行星靠太近的时候会被推开，离得太远了又会被拉回来。

对环形世界这样的空间结构而言，情况就完全不是这样了。它向外的离心力非常巨大，远远超过向内的恒星引力，而补足这个受力平衡式差额的，也是行星所不具有的东西：环形结构的内在拉伸力。环形世界就像是一台高速旋状的陀螺仪，如果整个结构偏离中心，就会开始振荡，振荡反映在环状结构的旋转中，使其更加偏离中心，而且速度很快。最终，这会让环形世界撞上它所围绕的恒星。但是这个过程也不会无声无息地进行，振荡幅度可能会越来越大，在撞上恒星之前，就让整个环形结构分崩离析。

### 19.5.3 变形问题

最后一个问题就是环形世界的变形，如果整个结构变了一点点，不再是正圆，那么它是倾向于"反弹"成正圆形呢？还是倾向于继续坍塌成一条线？我不知道这个问题的答案。这很可能取决于斯克里斯材料本身的性质。这种稳定性问题倾向于高度非线性的解答，因而也就非常困难。我的猜想是：由于存在巨大的离心力，问题会变得复杂很多。

### 19.5.4 其他大型空间建筑

在近期作品《天堂碗》中，格里高利·本福德和拉里·尼文又推出了一种新型太空建筑，本质上是半颗戴森球。它的整个结构，就好像跑得很快的汽车，车尾后面挂了一张降落伞。恒星是汽车，降落伞就是小说中的天堂碗[37]。这东西被用作超巨型宇宙飞船。建造它的目的非常神秘，人类是在第一次跨星际旅行的时候撞见它的。其中一个角色如此评价这个建筑：

> 那张壳本应该坠向恒星表面，它根本就没有绕星旋转。肯定有某种神秘的力量让它停在那里……只靠它自身旋转肯定不够——内部结构张力肯定随着曲率不同而有所区别。它中间肯定有某种支撑结构[37]33。

我完全不知道本福德和尼文有没有对这东西进行过稳定性分析。黑完了，夸两句吧：他们在本书中的确提到了人们对戴森球的误解，强调戴森本来的创意，就

不是建造一颗密不透风的球：

> 只是——古老的文献证明，戴森从一开始提议的就不是一个密不透风的球状刚体结构。他的意思是在宇宙空间中一个球面状的区域内建造大量轨道空间站，让空间站数量足够多，以便捕获一颗恒星释放的全部光能[37]33。

20世纪70年代，拉里·尼文曾写过一篇文章，题为《超现实世界》，他在其中谈到了各种不同的宇宙空间结构，从大型宇宙飞船直到银河这样的星系[180]。我觉得，这些空间结构全部是难以真正存在的，至于原因，就是戴森论文最早出现之后人们已经多次提出的那些。

## 19.6 让空想成为现实——以及有没有必要？

戴森提出这些空间结构设想的初衷，是应对人口过剩问题。但是，戴森的假设前提是全球人口一直这样指数式增长下去，就像马尔萨斯担心的那样。资源充足环境下，人口数量的确容易出现指数式增长。细菌群落就是这样繁衍的，只要有足够的资源，它们就拼命繁殖，每一代数量增加一倍，直到食物耗尽。自1800年工业革命时期以来，全人类的人口规模也的确保持了年均1%以上的增幅[69]。但是，人口增长的基础，恐怕还是因为有足够的资源。

无论是细菌还是动物，其个体数量都不可能永远保持指数式增长。它们的实际个体数量，更接近于我们讨论希尔伯特峰值时的石油消费曲线，是正弦图像式的波动。这在有限资源被不断加大使用量的情况下非常常见。戴森的立场是：人口增长的主要制约因素是资源，其中尤以能源最为重要。现在的问题是，就算有了那么多资源，人类会不会无限制扩张下去。戴森最早的论文发表之后，尤金·斯洛恩和波尔·安德森都在《科学》杂志撰文反驳他的观点[156]。安德森提出了一个非常有力的反驳依据，如果人口继续这样无限制扩张下去，这种空间结构反而更加不可能建成，因为早在它完工之前，人口就已经超过了戴森球能够容纳的极限。安德森写道：

> 甚至连戴森本人都承认，这项工程要花费数千年时间才能完成。而简单的事实就是：不加控制的人口膨胀会让戴森球完全没有机会建成，而如果对生育率进行控制，又会使其毫无必要[156]257。

目前的现实就是，第一世界国家的生育率已经大大下降，低于第二和第三世

界国家。原因首先是发达国家的人们易于得到避孕设施，以及其他一些社会原因，首当其冲的是男女平等的潮流。如果发展中国家也会出现当前发达国家的局面，全球人口出生率就将下降（搞笑的是，如果你相信全球能源枯竭，乃至末日四骑士出现，还是能得出同样的结论）。在乐观情况下，全球人口将来会出现停滞，甚至有可能下降。任何情况下，从长远来看，有计划地控制人口都是更为简单的解决方案。但是，我们还没有考虑超级发达的生命会采取怎样的态度。

注：

A. 在同样的质量/强度比例下，地球轨道中的建筑结构最大只能到100km，原因在于 $g$ 值较大，而 $r$ 值较小。这也是太空电梯难以建造的另外一个原因。

# 第 20 章

# 高级文明和卡尔达谢夫等级

## 20.1 卡尔达谢夫等级

*任何足够先进的技术，看起来都像是魔法。*

——阿瑟·克拉克 《未来愿景》

20 世纪 50 年代，艾萨克·阿西莫夫构想出一个庞大的“银河帝国”，以此作为“基地”系列故事上演的舞台。这个文明出现于距今数千年以后，囊括了整个银河系所有的恒星。他的这个设定非常成功，不只是描写第一帝国衰亡的最初三部曲很受欢迎，阿西莫夫还乘胜追击，又写了三部长篇小说记述了银河系第二帝国的崛起，并对最初那些小说的背景进行了解构。阿西莫夫死后，还有其他人续写了多部《基地》系列小说（运营商还挺精明）。他的世界体系也影响了一大批后辈科幻作家。银河文明曾出现于考德文纳·斯密斯的短篇小说中，体现了他“人类作为工具的特性”；还出现于拉里·尼文和杰里·波奈尔的《宇宙共和国》和《人类帝国》长短篇作品中，包括《上帝眼中的微尘》；此外还影响了《星际迷航》系列电视剧、小说、漫画、电影，以及《星球大战》系列电影和小说。拿破仑时代的政治阴谋，加上在超空间维度神出鬼没的星际战舰，似乎拥有无法抵挡的魅力。

前面我们已经用两章的篇幅，来讨论星际旅行无法回避的那些困难。成本、时间、能源需求等难题，几乎让我们遨游星群的愿景变成了一场大梦。但是从历史角度看，我们人类的技术社会还仅仅处在幼年时期，但技术的进步已经开始

呈现爆炸式增长的势头。也许，如果有足够的时间，人类最终还是能建立某种银河帝国(或至少是某种泛银河系文明)。

1964 年，在一篇论述寻找先进外星生命的论文中，苏联天文学家尼克洛・卡尔达谢夫提出了一份高级生命的等级标准：

Ⅰ类文明：有能力控制它们整个行星资源的文明；

Ⅱ类文明：能够控制行星所环绕的恒星全部能量的文明；

Ⅲ类文明：能够控制所在星系全部能量的文明。

事实上，自最初的论文中，Ⅰ类文明被描述成我们现代社会的样子，而并没有提到必须控制整个行星的所有资源。但是，自从论文发表之后，就被变成了上面所列举的面貌。

## 20.2 我们现在的 0.7 型文明

目前全球能耗规模为 $10^{13}$ W。与这个数字对应的，是全人类每一天的每一秒钟使用的平均能源数量。美国是全球最大的能源消耗国，占到全球能耗的 25%，尽管在未来半个世纪，中国和印度很可能将超过美国的份额。卡尔・萨根从卡尔达谢夫最初的笼统描述出发，编写了一个数学公式来计算每种文明所属的等级：

$$K=\frac{\log_{10}P-6}{10} \tag{20.1}$$

式中，$K$ 就是卡尔达谢夫等级评分，$\log_{10}$ 表示求取文明体系耗能规模以 10 为底数的对数值。使用对数方法可以降低数字规模，例如 $\log_{10}10=1$，$\log_{10}100=2$。由于取完对数的结果还要除以 10，所以，一个生命体系的耗能规模需要提高 100 亿倍，才能在萨根-卡尔达谢夫评级公式中上升一个等级。将我们地球目前的能源使用率 $10^{13}$ W 代入后，得出的结果是 $\log_{10}10^{13}=13$，$(13-6)/10=7/10=0.7$。所以，目前的地球文明，在卡尔达谢夫分级体系中的位置是 0.7 级。

我想设想一下，怎样才能让我们的文明等级评分升高到Ⅰ类文明。但首先，还是从同样的标准回顾一下工业革命之前的世界。工业革命前后的最大区别，就是能源的使用规模。工业革命之前，人类能使用的只有自身肌体的力量(加上少数几种牲畜的力量)，每人的“功率”大约仅有 250W。在一个假设有 1000 万居民的文明体系中，总功率就将是 $2.5\times10^{9}$ W。由此很容易求出它的卡尔达谢夫等级：$\log_{10}2.5\times10^{9}=9.4$，$(9.4-6)/10=0.34$。这应该能让大家对于评分的差距

有一个直观的认识，尽管工业革命前后的世界面貌差别巨大，但是在萨根-卡尔达谢夫评级体系中的评分差距却很小。我们也可以反过来计算给定 $K$ 值对应的能耗功率：

$$P=10^{10K+6}\,\mathrm{W} \tag{20.2}$$

Ⅰ类文明的能耗规模将是 $10^{10\times 1+6}\,\mathrm{W}=10^{16}\,\mathrm{W}$，或者说，比目前的人类生命能耗高 1000 倍。

如果我们猜想，人类世界的能耗规模每年增加 3%，那么能耗总量就将每隔 23 年左右翻一番。如果我们取一个数字翻倍，然后再把结果翻倍，这样重复 10 次之后，就可以得到大约 1000 倍(准确的数字是 1024)于最初数字的结果。那么，10 个能耗翻倍的周期就是 23×10＝230 年，到时候我们就成了Ⅰ类文明。这个有点儿道理，因为根据前面的计算，我们距离Ⅰ类文明的差距，跟工业化革命之前的社会跟现代社会的差距差不多。工业革命后也是花了大约 250 年的时间才发展出我们现在的社会，那么我们可以想象，可能还要花同样的时间才能升入下一级。

## 20.3　第Ⅰ类文明

Ⅰ类文明的定义，现在已经变成了完全控制本星球的能源和资源。资源是个很宽泛的概念，可能涵盖很多不同类型的事物。例如，Ⅰ类文明是否要有能力控制本星球的天气呢？不过，如果我们把注意力完全集中的能耗角度上，事情就会简单得多。

地球上最弥足珍贵的资源就是阳光。你不信吗？没有阳光，农业就不可能存在；没有阳光，所有人都会死；事实上，地球上所有的生命没有阳光都只能灭亡，因为它们的存续都依赖于阳光提供的能量。地球并不是一个封闭系统，没有阳光提供的能量，生活就无法继续。所以，从原则上讲，Ⅰ类文明要控制整个行星上的资源，首要任务就是要控制(或集取、使用)投射到地球上的全部阳光。

地球在海平面上的平均光照强度是 $250\,\mathrm{W/m^2}$，而阳光照射地球的总功率就是这个数字乘以地球表面积 $1.3\times 10^{14}\,\mathrm{m^2}$，所以来自太阳的光照总功率是：$250\,\mathrm{W/m^2}\times 1.3\times 10^{14}\,\mathrm{m^2}=3.2\times 10^{16}\,\mathrm{W}$，这个多多少少就是用萨根-卡尔达谢夫能耗方程算出来的Ⅰ类文明的能耗规模。但是，我们还是需要自问：人类文明能否达到如此高的能耗级别？如果能够，这么做又是否明智？首先，有很多原因导致我们或许不能收集太阳送给我们的全部能量。明显的局限因素之一，是

地球表面积的70%是海洋。尽管有人说：有信念者，万事皆可成。我个人还是很难想象，我们的后代会在所有海面上空铺满太阳能电池板。太阳能电池板的效率也不是很高，目前的最高水平也不过能把光能的20%转化为电能。我的另一个担心是：哪怕仅有10%的陆地面积被太阳能电池板覆盖，也会给地球生态环境造成灾难性后果。上述三方面因素都将降低收集太阳能的效率，使其比前面列出的最大数字低大约两个数量级。这样一来，就只相当于目前全球能耗水平的十倍左右了。这不是个很糟糕的结果，但离我们想象中"神一样的存在"还有较大差距。

当然，我们还有其他的能量来源。目前，唯一听起来可靠的能源是人工控制的热核反应。原则上，全球重氢资源能给我们提供取之不尽的能源，足够让每个人发家致富。但是，发那么多电还是有风险的，归根结底，维护我们这个文明体系运作的所有能源最终都会转化为热能。要是我们的电力来自阳光还好办，因为阳光本来就是要给地球加热的。但如果利用核能大量发电的话，地球温度就可能因此而上升一截。具体多少呢？嗯，仅靠阳光地球就已经维持了300K左右的平均温度；如果我们选用另一种发电方式，获得与阳光同样规模的能源，那么地球变暖程度就将扩大2.25倍左右，意味着地球平均温度将上升为360K(86.5℃，188F°)，热到让生物无法生存。这还是在忽视了发电过程可能造成的所有其他污染的情况下。太阳能本身，基本上不存在这个问题，因为太阳能本来就是要转化为热量的，不管你要不要先把它转化为电力。("基本上"在这里含义是：如果太多的太阳能电池板改变了地球的反照率，那么地球温度的确会发生变化)。

如果你下定决心要那么多能源，也就必须付出相应的代价。最终，Ⅰ类文明需要一个完全可控的生态系统。它将会要求整个生物圈经历一场剧变，以至于绝大多数动物(包括人类)都需要做出改变才能生存。像很多科幻小说中的其他创意一样，这个概念看来也来自奥拉夫·斯塔普尔顿的小说《最后的人和最初的人》以及《造星主》[225]。在《造星主》一书中，银河系各大文明用基因方法改变了他们居民的生物形态，变成了能效极高的超级智能昆虫，以便在时间的尽头用最高效率使用恒星放射出的能量。就像很多其他作者提出过的，这样的环境可能还会有很多其他的结果，例如大部分人类将自身"下载"到电脑系统中，然后就可以随心所欲地改变实体世界，而不需要担心后果。(克里斯·伊根等人的长篇作品中，就有类似的设定。)电脑可能会想要把我们消灭(或试图这样做)，就像《终结者》电影里展示的那样。然后由它们取代我们(小说《海伯里安》探讨了这种可能性)。我们也可能会改变自己的基因，以便适应高级技术带来的极为不同的环境，就像布

鲁斯·斯特林的系列小说《极世天网》中所写的那样。我们也可能无意中促成了这样的局面,因而获得了一个Ⅰ类文明(这差不多就是格雷格·贝尔名作《血音乐》中的故事),或者出现杂合上述多重变化的局面。汉斯·约阿希姆·斯奈伦胡珀等人合写的一篇高质量论文,以非常通俗易懂的方式阐述了这个话题[211]。

## 20.4 继续升级

*如果我们开局顺利,*
*就可以先把火星拆解,*
*只要找到足够大的扳手……*

——《家住拉格朗日点》“传统”民歌

现在,我们已经控制了整个行星的资源。下一步该干点啥了呢?继续升级呗!这还用问?

合乎逻辑的下一步,就是在宇宙空间或者其他行星建立人类殖民地。我们在其他章节已经讨论过这个问题,尽管在达到Ⅰ类文明水平之前,人们也可以试着兴建外星殖民地。但是,的确有一种后续步骤是现代人做不到的:对其他行星进行地球化改造。计划的内容是找到一颗没有生命居住(只是有可能这样)的行星,比如火星,然后把他变成地球人能够居住的环境。“能够居住”具体是怎么个意思,定义有那么一些模糊。但笼统地说,是人类能够在该星球的露天环境下生存。当然,人们可以想象用基因改造的方法改变人类自身,制造某种赛博格之类的复合体,以便能够在外星球现有条件下生存,而不是改造整个星球。或者采取某种双管齐下的做法,我们一边改造行星,一边改变人类自己,或许能最终收效。

很难想象这样大幅度的改变会意味着什么,或者到时候人类文明能否控制他们。目前,我们人类也在进行一场无法取消的长期实验,正在用改变大气成分的方式增加太阳热量的留存比率,而这已经给地球生态造成了较为严重的影响。保罗·克鲁岑和尤金·斯图默造出了一个新词“人类纪”,来描述我们当前的时代,因为人类从工业革命以来就开始影响地球生态和气候系统[61]。有人甚至把这个时代向前追溯至20 000年前的农业开始时期。

现在看来很清楚的是,一种文明消耗的能源越多,对周围环境的改变幅度就越大,也就越可能造成各种不可预知的结果。全球天气系统就是一个经典的混沌

系统案例——能够影响气候的很小事件，将来都可能会造成非常严重的后果。这一点，从1963年以来就已经广为人知。当时，爱德华·洛伦兹设计出了一个简单的地球大气环流模型[154]。洛伦兹说："当我们把结果……代入大气系统中……其结果表明，远期天气预报在任何情况下都是不可能的。"这有时被称作蝴蝶效应：一只蝴蝶在中国扇动翅膀，就可能导致席卷得克萨斯的一场飓风。地球生态系统是另外一个难解的混沌系统，只是它的反应周期很漫长：多数针对有限范围内的地球生态系统编制的数学模型(比如捕食者-猎物模型)，其中都包含强相关性的非线性微分方程，而它们正是混乱的标志。更糟糕的是，生态系统过于复杂，目前根本就无法判断这些模型能不能反映生物世界的原貌[231]。

## 20.5 第Ⅱ类文明

在卡尔达谢夫的分级体系中，第Ⅱ类文明能够控制整个恒星系统的能量，或者使用前面给出的算式计算，他们可以掌控 $10^{26}$ W 的能量。与太阳这样"普通"的恒星输出功率相当。从Ⅰ类到Ⅱ类文明的进化可能会是一个问题。我想不起来曾经读过任何科幻作品正面处理过这个过程。主要的问题在这里：要想获得整个恒星的能量，就需要拆掉一些行星。目的是用它们做成一道屏障，以便截留恒星发出的光。

拉里·尼文的小说《环形世界》，是这种方法的有趣案例。我们在第19章已经讨论过环形世界的动力结构，它是一个巨大的圆环，在地球到太阳的平均距离上围绕一颗行星转动。它的自转速度极快，而其巨大的规模也足以证明，只有Ⅱ类(或以上)文明才能把它建成。环形世界的居民能够控制他们所在恒星的能量。他们拥有一套"投影块"系统，不只可以用来制造昼夜交替的效果，还帮助人类操控日饵应对外部威胁。尼文的小说，用一种特别的方式证明了我们前文提到过的结论：人类为了在高度人工化的环境下生存，其本身可能会经历一些出乎意料的变化。在环形世界，文明的堕落导致人类社会发展成了彼此孤立的生态系统区，包括食尸族，一个吞食尸体的人类族群，他们扮演了地球上土狼的角色[183]。

Ⅱ类与Ⅲ类文明之间的文明体系，在大众媒体和较早期的科幻作品中极为常见，虽然并没有明确这样的称呼。行星联盟、银河帝国，这些作者们钟爱的称呼，顾名思义就已经超过了Ⅱ类文明。你不信？那我们来看一个小细节，来自《星际迷航：新一代》及其续集，这东西名叫"复制机"。

“复制机”可能是瞬间转移机器的后续产品。我们前面已经讨论过瞬间传输技术。由于种种原因，我认为瞬间转移不可能实现。不过现在，随和一点：我们就假设它能用。正如所有粉丝都知道的：皮卡德舰长对他办公室的一个小盒子说：“茶，格雷爵士，要热的。”很短时间之后，盒子里就出现了一个小茶杯。（人们禁不住想说：“里面装有某种液体，几乎完全不像是茶，可又多少有那么一点茶的味道。”——谢谢你，道格拉斯·亚当斯！）这茶到底是从别处泡好了传输过来的，还是凭空制造出来的，作品中并没有明确交代，很可能是后者，因为光子甲板也像是用这种方式运作的。那么，一杯茶的质量大约是250g，其能量价值约为$2.25\times10^{16}$J。这大约相当于目前全美国2.5h的能源消耗总量。如果行星联盟有70亿人口，每人叫了这么一杯茶的话，所需能量就可以达到太阳在半秒钟时间释放的规模！当然，我对行星联盟的人口规模估计数显然偏低。无论如何，这个小小的“复制机”就能显示出，联盟手里有大把的能源可以挥霍。如果我们假设整个联盟所有的饮食都是这么制造出来的，其能量需求就已经超过了几颗恒星的总和。

用这么浪费的办法泡一杯茶，的确是相当愚蠢的土豪做法。没有任何技术能保持100%的能效，制造一杯茶所释放出的冗余热量，可能足以融化（或汽化）复制机所在的任何容器。在我看来，多数科幻题材的电视和电影节目都不会老老实实处理这类细节。大致基于菲利普·K.迪克作品《机器人会梦见电子羊吗？》改编的电影《银翼杀手》，就展示了一个20世纪40年代视角上濒临崩溃的新世界。但就算在那个世界里，也有招募星际殖民志愿者的广告，暗示这个世界并不缺少能源。濒临崩溃与能源丰富，两者并不一定不能共存，但很容易由此引发各种冲突。

## 20.6　第Ⅲ类文明

斯坦尼斯拉夫·莱姆写过一篇讽刺性短篇小说，聚焦于已经达到可能世界最高发展阶段（HPLD）层次的外星人。他们基本上是饱食终日、无所事事，没事就创造个方形行星这样的奇迹出来玩玩，如此等等。他们向来访者解释说：他们什么都不干，是因为干什么都意味着退步。我也觉得，人们很难写出第Ⅲ类文明背景下的科幻小说，因为到了那个阶段，连克拉克的说法都显得过于温柔了。或许应该说：“一切真正先进的技术都像是神迹。”这样更为准确。在这本书中，我始终试图从现有的真正知识出发，按照已知物理规律构想未来的世界。任何一种达到卡

尔达谢夫分级Ⅲ类标准的文明，拥有了驾驭整个星系能力的那一种，其历史悠久程度肯定远远超过了我们人类。如果我们相信光速是终极速度，那么要扩张到整个星系，势必需要数百万年的时间。即便我们相信超光速旅行的现实性，可能还是需要这么漫长的时间。这样的文明还必须拥有一份远见和明确无疑的目标，远远超过我们现今时代的人类所能达到的程度。这是因为，只有以整个社会的存续作为最高使命，才有可能实现这样高的社会发展水平。其他一切都无关紧要。在前面的章节中我们已经看到，如果不需要载人，任何形式的太空旅行难度都会降低很多：将人类送往其他星球的代价极为高昂，到了近乎疯狂的地步，而且非常之危险。与此同时，这又是确保人类长期存续唯一可能的办法。这里的长期，指的是数百万年后，这将是我们下一章讲述的内容了。

# 第 21 章
# 古戈年

## 21.1　明天的明天

在本书最后一章，我打算触碰一下科幻小说中最宏大的主题：智能生物在宇宙中的终极命运。“终极”当然就是非常久远的未来。在前面的章节中，我们已经考察过真正先进的文明可以做到些什么，会在如何极端的程度上改变我们周围的世界。在这一章，我想回答的问题是：如此先进的文明能够维持多长时间？这一章的时间跨度，将远远超过地球人类的历史，乃至今天以前的整个宇宙史。让我们思考人类以及所有智能生物在宇宙中的未来命运，将视线延伸至数亿年、数十亿年，乃至更长时间以后。

## 21.2　“短期”展望：5 亿年以内的时光

我们人类这个种族，能不能活过将来 100 年都还不一定，更不要说未来几亿年了。即便我们不把自己搞死，自然发生的气候变化也可能会把我们大家全都解决掉。因为地球公转轨道缓慢而有周期性的变化，地球表面会经历冰川期与消融期交替的气候模式。每十万年是一个轮回，80 000 年的冰川期，加上大约 20 000 年的间隔期。目前为止的整个人类历史，都处在最近一次冰川间隔期内，因为农业的产生，导致了稳定的人类社会形态存在。而农业出现的前提，又是 15 000 年前的

冰川消融。目前人类面临的最大短期威胁是全球变暖。如果我们挺过了这次的挑战，我们的后代在数千年后将会面临的，却将是全球变冷。现在仍无法断定人类能不能活过一次冰川时代，尽管在这个问题上，仍有很多无人可解的主客观因素。不过从物理学规律上来讲，我们没有什么非死不可的危险，所以我打算乐观一点，把人类能够继续存续的时间（在冰川纪之前年数的基础上）扩大 1000 倍。从物理学角度看，这段时间内发生的问题都很简单。

未来几亿年之间，人类面临的最大威胁应该是来自小行星和彗星，就像 6500 万年前导致恐龙覆灭的那些一样。当时撞击地球的小行星或者彗星，直径大约有 20km。估计其撞击速度应为 40km/s，质量为 $10^{15}$ kg，撞击能量约为 $10^{24}$ J。这比全世界全部核武器同时引爆释放出的能量还要高数十亿倍。这类撞击已经被很多科幻作品描述过，比如说《撒旦之锤》、电影《末日天劫》和《行星撞地球》都讲了这类撞击故事。在前面的章节，我们讲过核战争可能带来的损害。其中最大的威胁来自核冬天，因为飞起的粉尘会遮蔽阳光。恐龙灭绝那次的撞击，可能会遮挡阳光好几年，导致地球表面大部分生物批量死亡。关于地球史前生命灭亡的解释之一，就是每隔一亿年左右，就会有这么一颗“恐龙杀手”撞击地球。

即便是规模较小、频次较高的天体撞击，也有可能会毁灭人类文明，乃至整个地球上的所有生命。天文学家们已经在 1993 年见证过一次此类撞击，那是苏尔梅克-列维彗星撞击木星事件。这颗彗星在撞击前被撕成数块，而其大小本来就比“恐龙杀手”小一些。但它撞击木星释放出的总能量，还是超过地球全部核武器的总和。

现在看来，未来几亿年间地球遭遇此类撞击的可能性非常大。太阳系还有不少大块头可能撞到我们，很多小行星的轨道都经过地球附近。十年前就曾经引发过恐慌，当时有科学家预测 99942 号小行星“阿波菲斯”在 2031 年撞击地球的概率“无法确认为零”。

## 21.3 “中期”前景：$10^{13}$ 年以内

也许，将来足够发达的文明体系会愿意搬走我们的行星。如果这样，甚至还可以把小行星和彗星的撞击变成有利因素。人们有充足的理由想要搬走地球：短短十亿年之后，我们这颗太阳的亮度就会提高 10%[130]。这会迅速让地球表面的温度提高到生命无法存在的水平。我们的后代（或替代物种）可能会愿意把地球

搬到离太阳远一点的地方，以便让它保持凉爽。到时候，他们大约只需要把地球向外挪动0.05AU，就可以让太阳光照保持目前的强度。再往后很多年，到大约50亿年以后，太阳会耗尽其核心区域的氢气而膨胀成为红巨星。届时它的亮度会达到目前水平的好几千倍，而且太阳本身也会膨胀到目前的水星轨道附近。那么，到时候地球能搬去哪里呢？

搞笑的是，把地球搬离太阳1AU所需的能量，跟拆掉地球所需的能量大致相当。如果我们要把质量为$M_p$的行星从半径为$r_1$的轨道搬运到半径为$r_2$的轨道，整个行星-恒星系统的能量变化情况是

$$\Delta E=\frac{1}{2}(GM_sM_p)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right) \tag{21.1}$$

1/2这个因子来自所谓的“维里定理”。总之，把地球从1AU轨道搬迁到2AU，造成的$\Delta E=2\times10^{33}$ J，约等于太阳两个月的能量总输出。包括弗里曼·戴森在内的几位作者都考虑过搬迁的具体实施计划。

谈及这个问题的有一篇论文很有趣，利用了前文我们提到过的“弹弓效应”[142]。一颗质量为$m$的小行星，从距离太阳很远的地方靠近到半径为$r$的轨道，沿途增加的动能数值为

$$K=\frac{GM_sm}{r} \tag{21.2}$$

令$r=1.5\times10^{11}\text{m}\times a$。也就是说，用天文单位表示这段距离，那么：

$$K/m=8.85\times10^8\text{J/kg}\times\frac{1}{a}$$

小行星到太阳距离为$a$时的速度为

$$v=42\text{km/s}\times\frac{1}{\sqrt{a}} \tag{21.3}$$

理论上，这样一颗小行星如果撞击或接近撞击地球，其速率改变的幅度数量级应为

$$\Delta v\approx\frac{m}{M_E}v\approx42\text{km/s}\times\mu \tag{21.4}$$

其中的$\mu=m/M_E$。这跟宇宙飞船贴近掠过行星实现加速的原理是一样的。但是，眼前情形的目的却恰恰相反：我们想要改变的是行星的运动状况，而不是飞船的。在原先的情况下，宇宙飞船的速度被大大改变，因为行星质量比它大了足足$10^{22}$倍。而在当前情况下，地球轨道的调整幅度将极为微小，因为即便是较大的小行星，其质量也只有地球的一小部分。有很多冰冻的废墟环绕太阳运行，有的距离30AU，最远可以到1亿AU。从30～200AU距离上的柯伊伯带是矮行星冥王星和埃利斯所在的地域，它们两者的质量都在$2\times10^{-3}M_E$级别上。那里很可能有数

以十亿计的小块冰、尘土和岩石。整个柯伊伯带的质量被估计为 $30M_E$。你可以想象，将来技术足够发达的文明控制了轨道上这些废墟，刻意让它"坠落"到太阳系内侧。如果对其轨道的掌握足够精准，让它们可以在地球近旁经过，就有机会改变地球公转速度，从而让地球的轨道向太阳系外围移动。这样做非常费时，从100AU 的距离"坠"向太阳的天体，需要大约 175 年时间才能到达地球公转轨道。那篇论文的作者估计，地球需要经过 $10^6$ 次差点被击中的险情，才能把轨道半径增加到 1.5AU。他假设 $\mu = 1.7 \times 10^{-6}$，或 $m = 10^{19}$ kg。需要达到的 $\Delta v$ 应该是 10km/s 级别的。论文中强调的一点是：小行星达到地球轨道的时间，必须精确到分钟。而每次运作都可能会花费数百年，乃至上千年。

地球"转轨"所需的能量达到 $10^{33}$ J 级别。而我们移走地球的最后期限在 10 亿年后，这意味着我们每年花费的能量为

$$P = 10^{33}\,\mathrm{J}/(10^9\,\mathrm{a} \times 3.16 \times 10^7\,\mathrm{s/a}) \approx 3 \times 10^{16}\,\mathrm{W}$$

这个数字目前仍比我们整个文明的耗能水平高三个数量级。或者说，与卡尔达谢夫Ⅰ类文明的耗能水平相当。这合乎常理：没有大批能量，就不要试图把行星搬来搬去。

搬走地球的目的是保护地球上的气候条件，使其免受太阳主序星生涯结束的负面影响。等太阳进入后主序星时期之后，情况会变得更加复杂。太阳转变为红巨星过程中，其辐射量会短时爆发至当前水平的 1000 倍以上，但这次"氦闪"之后，其亮度就只有目前水平的 100 倍左右了[130]468~470。按光照最强时考虑，地球应该移动到离太阳 30AU 距离处。(大致与冥王星轨道相当)，而在此之后的适当距离，是大约 10AU。这个过程发生于数百亿年间，而不是数十亿年。也意味着搬走地球的能量需求比我们刚才考虑的更高数千倍。对一个足够长寿的观察者而言，能幸存的地球就像是被疯子乱打的乒乓球。搬运地球的成本应该是在卡尔达谢夫Ⅱ类文明能承担的范围内。尽管到那时候，把每个人都搬走到新的星系，还比搬运地球简单一些。

## 21.4 "长期"前景：直到时间尽头(古戈年)

*然后，AC 说："要有光。"*

——*艾萨克·阿西莫夫《最后的问题》*

我想再次强调自己所有讨论的前提：要讨论全宇宙的远景，自己心里势必要

有一套宇宙演化模型。我现在作为出发点的理论，是天文学家们目前最好的体系。被称作"膨胀性宇宙大爆炸共识模型。"这个模型的主要理论要点包括：

(1) 整个宇宙起源于大约137亿年前的一场大爆炸。我们不知道在此之前存在过什么(假如这个问题有意义的话)，也不知道是否存在跟我们一样的其他宇宙。

(2) 宇宙诞生之后，很快经历了多个发展阶段，迅速从一颗质子那么大，膨胀为篮球那么大。这种过程被称为"暴胀"，人们对膨胀的大部分过程细节都缺乏充分的认识，但看来有足够有力的证据证明它的确发生过。

(3) 整个宇宙的质量-能量配比情况如下：宇宙中大约3%的物质是普通物质，就像我们在地球上常见的事物一样，其中90%的成分是氢。至于剩下的97%，大约23%是暗物质，科学家们也不知道它们到底是什么，只知道它们看起来跟普通物质很不一样(也就是说，除了引力作用之外，不会与其他物质发生激烈反应)。另外74%是"暗能量"；我们对它们真的一无所知。

(4) 整个宇宙是"平衡的"，意思是全宇宙的物质/能量总量(不含重力场自吸引力)与宇宙中的重力场自能量完全相等。

(5) 但是，虽然宇宙平衡状况如此理想，暗能量却在加速宇宙扩张的速度。以至于宇宙在扩张过程中不只没有因为重力作用放慢膨胀速度，加速度反而在不断上升。

这套共识模型是从1998年以来渐渐形成的，当时，对远方超新星的观测导致了对暗能量规模的测量，以及对宇宙扩张加速情况的量度。本书不适合具体罗列共识模型的证据。大家知道有很多就行了。如果你有兴趣多了解，可以读一本入门级的天文学课本(比如《21世纪天文学》)，或者读一本流行科普书，比如马里奥·利维奥写的《加速中的宇宙》[130,153]。确保你看的天文学书是1998年后出版的！任何此前出版的书，关于宇宙论的部分都已经完全过时。

宇宙不断加速扩张理论的推论之一，就是永远不会出现一次"大转折"，让宇宙放慢扩张速度然后开始收缩。(我个人更喜欢道格拉斯·亚当斯的说法"宇宙没有刹车板"，不过，能把事实说清楚就行了)。这些新的发现推翻了《宇宙过河卒》之类的小说中讲述的"爆炸—收缩—再爆炸"样式的轮回。这样的假设似乎更有美学上的魅力，但宇宙它偏偏就不是这样子。

在科幻作家中间，奥拉夫·斯塔普尔顿大约是第一个思考宇宙超远期前景的人。我们在前文中已经提到过《造星主》[225]，在这本书里，斯塔普尔顿默认了开放

式宇宙的观点，在时间的尽头，全宇宙只剩下很多相隔极其遥远，无法互相沟通的星系，每个星系中曾经巨量的人口也逐渐凋零。斯塔普尔顿之后，宇宙的远期前景也进入了一些其他科幻小说作家的作品中，多数作者都喜欢“封闭宇宙”，或者周期循环的宇宙，就像《宇宙过河卒》，因为这样的宇宙可以有一个无限的未来。这样一来，就算人类有一天会不复存在，也会有其他形式的智能生物在宇宙的下一个轮回中崛起。

恒星作为主序星的主序周期，与它本身的质量有关。例如，40 亿～50 亿年后，我们的太阳就将度过主序星阶段，膨胀为红巨星，亮度将超过目前数值的 100 倍。随着它的核聚变燃料逐渐消耗，它的温度将持续降低，并收缩为白矮星。其总光照强度，初期仅相当于当前的 $10^{-3}$ 倍，此后还会继续降温。更大的恒星会更快耗尽它们的燃料，并在壮观的超新星爆发中结束自己的生涯。质量较低的恒星，寿命会比质量大的恒星长很多。幸运的是，天空中的大部分星星都是低等级的 M 类恒星，亮度较低，但寿命很长。这就是我们有可能(像阿西莫夫小说里写的那样)在太阳变成白矮星时，移居到其他星球。恒星的生命周期可以用下列方程近似计算：

$$\tau = 10^{10}\text{年} \times M/L \tag{21.5}$$

其中的 $M$ 是恒星质量，$L$ 是其亮度，从第 14 章可知，一颗 M7 类恒星的 $M=0.08$，$L=0.0025$，其主序星生命周期为 $3.2\times10^{11}$(即 3200 亿)年。这个估计很可能会低于它的实际生命周期。我们的太阳在膨胀为红巨星之前，消耗的氢只占总量的 10%。原因在于，太阳中心的氢不处于对流状态。也就是说，没有因为温差产生的扰动效果。这样一来，发生聚变的太阳核心一旦消耗完本地的氢，就得不到更多供给。而 M 类的红矮星，其核心区是完全对流的，也就是新燃料可以持续添加进来。这将延长它们的主序星寿命，有望超过我们简单的估计[47]。接近恒星质量极限的恒星，寿命可能会长达 $10^{13}$ 年。

人类面临的长时期考验与我们的文明目前面临的短期考验相似：也是资源枯竭。我们现在正迅速消耗地球上的化石能源。而在想象中的遥远未来，我们将耗尽的则是恒星资源。如果人类文明能够持续数十亿年之久。我可以有信心地说，届时我们应该已经掌握了某种星际航行技术，因为我们真的需要它。也许我们会有能力把整个行星搬往其他星球。弗里曼·戴森和拉里·尼文都曾考虑过实现此目的的方法。

## 21.5 以黑洞为动力的文明

等到所有的恒星熄灭，那就是宇宙的末日了，对吗？再也没有新的能量来源了，不是吗？嗯，可能还真的不是。即使所有的恒星都已经冷却，黑洞还会存在很长时间，而它们在遥远的末日时代，的确有充当能量来源的潜力（这段时间甚至会比宇宙的其他任何时段更长久）。

黑洞可能看上去并不是理想的能量来源。说到底，人们对于它的印象无非是吞噬进入其中的一切，而什么东西都出不来。但是，这个印象并不完全准确。正如我们在前文说过的，黑洞能辐射出能量（霍金辐射），尽管其强度太低，难以直接探测到。

有两种方法，可以从落入黑洞的物质中获取能源：

(1) 落入黑洞的物体经过吸积面时被加热，可以放射出电磁波；

(2) 通过重力辐射。

第一个过程原理比较简单：不旋转的黑洞，其事件视界仅与黑洞的质量有关：

$$R_{\mathrm{BH}}=\frac{2GM}{c^2}=3(\mathrm{km})\times\frac{M}{M_s} \tag{21.6}$$

其中的 $M_s$ 是太阳的质量。依此计算，一个质量 10 倍于太阳的小型黑洞，其事件视界半径将为 15km。想象一下，将 1kg 的物体从远距离之外丢向黑洞，然后在距离事件视界 3 倍半径时突然让它停止。在下坠过程中，它获得的动能将为 $1/6mc^2=1.5\times10^{16}$ J。我这里假设牛顿力学公式成立，这与相对论公式的数值接近。选择离黑洞 3 倍半径距离停住的原因如下：

(1) 三倍半径之外，这是能够拥有稳定轨道的最近距离；

(2) 这也是我感觉能够使用牛顿力学公式估测可释放能量的最近距离。

这是非常大量的能源。假设我们能 100% 回收此过程中产生的能量，我们只要用 600kg 垃圾，就可以满足当今美国的全部能源需求。这基本上是天文学家们用来寻找巨型恒星变成的黑洞的方法：如果黑洞在普通恒星的轨道附近，恒星上的气体就会被吸入黑洞。气体坠入黑洞过程中产生的摩擦力，令其升高到数百万乃至数亿度，放射出能量巨大的 X 射线。

另外一种利用黑洞产生能量的方式就是通过引力波。重力波可以算是时空

中的波纹，有人预测说，合并中的黑洞是引力波的强大来源。这是激光干涉仪引力波观测站一直在寻找的重点目标之一。理论上，任何落入黑洞的垃圾，其质量中蕴含的能量都可以有50%可以回收利用[236]。这比任何其他已知的能源效率都要高得多。

科幻小说中使用黑洞提供动力的设想，至少可以回溯到20世纪80年代。我个人第一次看到它出现，是在查尔斯·谢菲尔德的系列小说《麦克安德鲁编年史》中，同名主角是一位天体物理学家[217]。在那些短篇小说里，迷你黑洞除了被用来给飞船提供动力，很可能还有其他用途。霍金辐射的发现让这些小说过了时。因为这些黑洞会过快蒸发，根本就来不及被使用。新的《太空堡垒卡拉狄加》系列最后一集，安排那些希伦人环绕一个黑洞航行，用丢弃垃圾进去的方法为它们的文明提供能量。

当所有恒星已死，幸存的文明获取能量的方式就是这样子：找块没用的垃圾，扔进附近的黑洞里。这引发了很多奇怪的推理和设想，以及各种神奇的情节。你可以想象在遥远的将来，某种文明可能会为了确保未来一年的能量收成，给黑洞献祭一两位纯洁的少女。这肯定比把她们丢进火山口管用。

## 21.6　质子会衰变——确定吗？

有一件事情可能会打断我们遥望永远的快乐盛宴，那就是普普通通的物质，可能会悄无声息地消失不见。这个厄运之声就是质子衰变的可能。

质子是组成普通物质的三大基本成分之一。其他还有两种，一是电子，质量最轻，仅有质子的一千八百分之一，它是一种稳定的粒子。另一种中子可就不稳定了：它是一种中性粒子，包含一个“上”夸克，带电属性为“+2/3”，还有两个“下”夸克，分别带电“−1/3”。脱离原子核之后，中子可以衰变为一个质子、一个电子和一个具有反电子属性的中微子。衰变过程中，有一个下夸克转变成上夸克，这就让中子便成了质子。质子的夸克组成是两上一下，整体电荷为“+1”。中子衰变的周期，按物理学标准是比较长的，足有数十秒之久。因为质子也不算是“基本粒子”，也同样存在着衰变为更轻粒子的可能。

这还从来没有在实验中发现过，但弦理论之类的物理学体系已经预测它会发生。如果质子会衰变，那么它的衰变周期非常长。宇宙已经存在了137亿年，这

个可以当作质子衰变的时间下限。如果质子衰变的周期比这个时间快很多，我们人类就不可能出现了。因为运用弦理论计算任何东西都很难，所以目前对质子的衰变周期也没有很好的预测。但是，有实验把质子的生命周期确定在 $10^{34}$ 年以上。我有一位朋友说，用这个数字定义“永恒”还挺不错。但是，对我们现在的问题而言，这么长的时间还真是不够！

## 21.7　古戈年——直到所有黑洞都蒸发

如果质子不会衰变，定义整个宇宙中生命末日的应该就是黑洞蒸发尽的那一天。黑洞的蒸发是一种量子力学现象。如果我们试图把一颗粒子放进黑洞，量子力学原理告诉我们说，你有较小的可能性发现它还在黑洞的外面，这是因为海森堡不确定性原理。我们在网上的习题会涉及这个问题的基础。基本事实是，1974 年，斯蒂芬·霍金证明了黑洞并不完全是黑的，他们是一种黑体辐射源，尽管本身温度很低。有一小部分能量会从黑洞中逸出，人们甚至可以界定它的温度：

$$T_{\mathrm{BH}}=\frac{hc^3}{16\pi^2 Gk_{\mathrm{B}}M}=6.2\times10^{-8}\times\left(\frac{M_s}{M}\right)\mathrm{K} \tag{21.7}$$

其中的 $M$ 是黑洞的质量，而其他概念都已经在本书中定义过。一个质量与太阳相等的黑洞，其温度将只有 $6\times10^{-8}$ K，而更大的黑洞温度会更低。不过，即便是对如此反常的对象，黑体辐射标准公式依然有效。人们可以证明，黑洞辐射能量的速度与 $1/M^2$ 成比例。一个完全孤立的黑洞会马上开始将能量辐射出去。其质量也会随之降低。而随着质量的降低，它辐射能量的速度将会加快，其大小的缩减速度也将更快，导致在它存在的最后几秒钟能量爆发。下列公式可以用来计算黑洞存在的时间：

$$\tau_{\mathrm{BH}}=\frac{32\,768\pi^2}{3}\frac{G^2}{hc^4}M^3=2.2\times10^{67}\times\left(\frac{M_s}{M}\right)^3\ 年 \tag{21.8}$$

质量与太阳相当的黑洞，生命周期会远远超过所有的恒星。一种更为常见的黑洞，质量约为太阳的 10 倍。它的生命周期是 $2\times10^{70}$ 年。但是，跟最大的黑洞相比，它们也不过是小小花生米而已。

在每一个星系内部，都有一个超级巨大的黑洞，质量可能有太阳的数百万

倍到数十亿倍。我们银河系的黑洞还算比较小的，质量仅相当于大约 3000 万个太阳。围绕这样一个黑洞的文明，可以居住在人造行星或者戴森网上，最大可能维持长达 $10^{89}$ 年。这已经大大超过了目前为止宇宙的年龄，但我们还有更厉害的呢。

人类迄今为止探知的那些最大黑洞，质量超过了太阳的 $10^{10}$ 倍。它们远在数十亿光年之外，但我们想去那里的话，有的是时间。质量为太阳 700 亿倍的黑洞，寿命就将达到 $10^{100}$ 年，一个古戈年。目前还没有发现这么大的黑洞。最大的那个发现于 2011 年 4 月，质量为太阳的 210 亿倍。不过，我会假设人类还能找到更大的，因为写“一个古戈年”，要比 $10^{98}$ 年酷得多。

对比一下，为了说明这个数字有多久。整个宇宙目前的年龄大约是 $10^{10}$ 年，假如我们用一颗质子的质量来代表整个宇宙的当前年龄，那么，该用多大质量代表古戈年呢？世界上所有海滩沙子的质量？不对。地球的质量？不对。太阳的？还不对。整个宇宙的？还是不对。能够代表古戈年的，应该是 100 亿个我们这样的宇宙中所有可见的质量。顺便说一句，写这个部分最大的满足，就是我终于找到了一个机会，来使用“古戈”这个概念。尽管商业上取得了巨大的成功(谷歌公司)，但无论是在数学界，还是物理学界，这个词儿都极少会用到。

我并不是第一个考虑这些问题的人。写这本书的一大有趣之处，是有那么几个名字随时都会跳出来。拉里·尼文和波尔·安德森，是随时充当我灵感源泉的两位科幻作家。在科学家之中，弗里曼·戴森显然是最突出的一位。在 1974 年发表的一篇论文中，他做了我在这章所做的同一件事：计算宇宙中的智能生物能够存活多久[73]。他的结论比我更乐观，他相信宇宙中的生命可以永久存续下去，只是会交替采取休眠和活动两种状态，每个活动周期的能耗水平不断减小。有一点值得注意，由于这篇论文年代较为久远，其中的有些前提已经不符合当前主流的宇宙观。尤其是，共识模型推翻了他的一些信念。另一篇论文《垂死的宇宙：天体的远期命运》，作者为弗雷德·亚当斯和格里高利·拉夫林，对此类问题的分析更为贴近现时代。我推荐关注超远期未来的科幻作者读这本书，因为其中包含相当丰富的数据和公式，详细展现了宇宙的最终命运[20]。这篇文章也略微有点过时，因为它出现于超新星测量事件催生宇宙加速扩张理论之前。不过，在它的最后一部分，讨论宇宙命运的时候，还是采用了非零的宇宙常数。

## 21.8 我们最后的致意

我的笔就此停住，但我本人将继续生活。读者，你不必再与我同行，我们都该回到各自的生活里去。

——吉恩·沃尔夫 《奥塔克城堡》

杰克·万斯、艾萨克·阿西莫夫、吉恩·沃尔夫、尼尔·盖曼，还有其他很多很多人，都曾经写过场景设在时间尽头的小说。这通常意味着地球时间的尽头，但也有人比这走得更远出很多很多。正如我在本书开头声明过的，本书无意于进行预测。这个论断，也适合所有科幻小说。我并不认为人类可以活到古戈年；即便真的做到了，在今天的人们看来，也只会有很少一点点时间，还能认出他们的面貌。但是，即便在最为反常的小说里，为了让我们这些人类读者能够接受(甚至理解)其中角色的作为，就必须让他们依然是人类。这恐怕就是文学最大的局限：其实，一个小小种族的希望与梦想，对整个宇宙来说，不过是渺小得像一堆豌豆而已。或者，我们应该想起尼尔·盖曼的一句话：如果你想要你的故事有一个好的结局，就一定要让它及时结束。

我想用一段深得我心的话结束这本书。希望这是一种譬喻，既是对科幻，也是对人性中一切美好的东西。这段话的作者，是伟大的法国数学家亨利·彭加勒：

地质学史告诉我们，生命只是两段漫长死寂之间的短暂插曲，而即便在这段时期，理性之光也仅仅持续过、将来也还是只能持续短短的一瞬间，思想是一道光，刺破这漫漫的长夜。

但也只有这道光，才意味着一切[192]。

# 致　谢

任何一本书，都是很多人通力协作的结果，而不只是依靠作者一个人。您所读到的很多内容，都是作者以外其他人努力的结果。任何可能出现的错误，当然应由作者承担责任。

首先，最需要感谢的是我在普林斯顿大学出版社的编辑维基·凯恩，正是他的支持与热情，才让这本书成为可能。我还想感谢奎因·法斯汀、娜塔莉·巴恩和玛乔里·潘尼尔为我提供了极为重要的帮助，并感谢在出版社和其他环节为此书作出贡献的人们。

我还想感谢自己非常欣赏的一位科幻作家拉里·尼文，感谢他允许我转载他给罗泽·格拉兹尼的信。这份材料是我在格拉兹尼的档案里找到的，文件存储于马里兰-巴尔的摩大学埃尔宾·库恩图书馆的阿琪尔·罗森菲尔德科幻小说档案馆。我想感谢该馆的工作人员，尤其是馆长托马斯·贝克为我提供的帮助。这本书的研究和写作，很多都是在华盛顿的国会图书馆完成的。我感谢主阅览室的工作人员帮我寻找图书和文献，感谢他们提供了如此完美的工作空间。

对我产生过影响的科幻作家有太多，不可能在此一一罗列，但有两位，我一定要特别提到。一位是波尔·安德森，我把这本书题献给他，因为他关于科幻的文章对我的启发；另一位是奥拉夫·斯塔普尔顿，他为世人展现了幻想小说的最高境界。在世科学家当中，弗里曼·戴森可能是对硬科幻影响最大的一个人。

我的同行，东京大学的马克·威金斯，他最早提出了第 7 章中写到的“绳端甩脱”构想。马克是我见过最聪明的人之一，从中学时代以来，我们就一直是好朋

友。他慷慨地准许我把他的观点展示在本书中。绰号“大弓”的安东尼·伯多因·范里珀,是一位科幻和流行文化专家。他在航天飞机成本计算方面,给我提供了不少宝贵信息。海军大学物理和气象学专家雷蒙德·李,为第3章“霍格沃茨为什么那么黑?”测量了蜡烛的照度值。他还为我讲解了亮度评测中的疑难之处,并对测量不同光源的光照强度提出了宝贵的建议。我还想感谢泽柯·吉斯林,他在图书版式和页面布局方面为我提出了非常重要的意见。

普林斯顿大学出版社聘请的匿名评审专家,针对本书内容提出了一些需要修正的问题。我感谢他们勤勉的审读,以及他们对本书的支持与帮助。我还想感谢莱利·韦恩斯坦和保罗·纳辛在审读本书写作计划方面所做的工作。

2009年春季学期,我在圣玛丽大学《科幻中的科学》课程中,尝试过很多本书中提到的观点。我感谢选修这门课的同学们:罗杰·丁、亚当·哈默特、格伦·亨奇、德文·吉拉德、马洛里·诺特、詹姆斯·莫多尔斯基、大卫·潘克斯、阿比·泰勒和大卫·汤多夫迪克。是他们帮我测试了本书的第二和第四部分。我很抱歉,本书没能收录他们富有创意的课堂设计作业。1996年,我还曾在克利夫兰大学讲过这门课程的早期版本。我也感谢当时上那门课的同学们,尽管现在已经找不到名单了。

我的妈妈路易斯·阿德勒,读过本书的一份初稿,除了鼓励我之外,还对全书结构提出了一些具体的改进意见。最后,也是最重要的,我想感谢我的妻子凯伦和我们的女儿亚历桑德拉和卡姗德拉,感谢她们一直以来给我的爱与支持,尤其是写作这本书的过程中。Scio quid sit amor[1]。

---

[1] 拉丁文,大意是“我知道爱是什么。”

# 附录　牛顿三大运动定律

本书中，我选择了集中讲述已知物理学规律的立场。这跟很多有关科幻小说的图书有所不同，它们往往会更乐于挖掘未知的、争议性的话题。因为我是一名物理学家，所以本书的大部分注意力，都集中在科幻小说中的物理学知识方面。但是，要了解这些，就需要懂得一点最基础的知识。读懂本书的基础，就是明白艾萨克·牛顿爵士300多年前提出的三大运动定律。这份附录提供的是一份非常简短的引论，介绍三大运动定律和两种特殊形式的加速运动、匀加速直线运动和匀速圆周运动。我假设读者对“力”、“速度”、“质量”这几个概念有一些了解，即便不同于物理学家的定义也没有关系。

介绍牛顿运动定律之前，我们先要了解三个重要的概念，它们是位移、速度和加速度。物体的位移，意思是把它从一个位置移动到另一个位置的过程。它包括移动距离和移动方向两个因素，都相对于某个参考系给出。速度，就是物体移动的快慢程度，加上表示物体移动方向的要素，是位移相对于时间的导数。

$$\boldsymbol{v}=\mathrm{d}\boldsymbol{r}/\mathrm{d}t \qquad \text{(A1)}$$

其中的 $r$ 表示位移，而 $t$ 表示时间，公式中的粗体字，表示我们既需要知道位移和速度变量的数值，也需要知道它们的方向。有几种不同的方式来表示这类既有大小、又有方向的变量。有兴趣的读者可以参考初级物理学课本，如《物理学初步》[246]。

加速度是指速度变化的快慢，用微积分方法定义的形式为

$$\boldsymbol{a}=\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t \qquad \text{(A2)}$$

其中的 $a$ 就是加速度。因为加速度的定义中也包含方向，所以无论是运动方向变

化，还是速度的数值变化，都可以说它存在加速度。

## A.1　牛顿运动定律

牛顿第一运动定律：没有任何实验能够区分匀速直线运动状态和静止状态。这个并不是牛顿第一运动定律通常的表述方式，但却是最准确的。所有运动都是相对运动。因为作用力产生加速度，我们可以测得速度的变化幅度，但无法测量绝对速度本身。

在讲解牛顿第二运动定律之前，我们需要给“力”下个定义。“力”就是推或拉造成的效果。

牛顿第二运动定律：力产生加速度。数学式表达为

$$\boldsymbol{F}=ma \tag{A3}$$

式中 $m$ 是物体的质量。推力或者拉力会造成物体速率（即速度数值）或者运动方向的变化，但并不能直接产生速度本身。这是牛顿第二运动定律的难点之一。

牛顿第三运动定律：如果物体 A 对 B 有一个作用力，那么 B 对 A 也有一个作用力，两者大小相等、方向相反。如果我用 100N 的力（大约与 20 磅物品的重量相当）推一面墙，墙也用同样大小的力朝相反方向推我。第三定律引申出了动量守恒定律，后者出现于第 2、6、15 章。

特殊运动：本书中提到的全部变速运动，都属于两种类型：匀加速直线运动和匀速圆周运动。

匀加速直线运动：如果强度为 $F$ 的力作用于物体，且力的方向不变，大小也不随时间变化而变化，那么受力物体就会有一个不变的加速度：

$$a=F/m \tag{A4}$$

我是在用日常语言描述力的大小和加速度数值，并没有提到它们的具体方向。物体将沿直线运动，如果初始速度为零，那么一段时间之后的速度就是：

$$v=at \tag{A5}$$

相应的位移是：

$$x=\frac{1}{2}at^2 \tag{A6}$$

当物体沿直线运动时，习惯上用 $x$ 或者 $y$ 表示其位移。其中 $x$ 通常表示水平

方向的移动，而 $y$ 通常表示上下方向的移动，比如自由落体。

圆周运动和恒定速度。就算速度数值是不变的，圆周运动也是一种变速运动，因为运动的方向在不断变化之中。此时改变速度的力指向圆心。这种运动因此也常被称作向心运动（“指向圆心”）。其加速度的值为

$$a = v^2 / R \tag{A7}$$

其中 $v$ 是速度，而 $R$ 是圆的半径。真正造成这样运动的力（向心力）是向内指向圆心的，但如果有人坐在圆周运动的容器内，会感觉像是有一种向外的离心力，与向心力大小相等。由于牛顿第一定律，可以说离心力是一种假象，但却常常是一种有用的假象。

## A.2 常见的作用力

实际上仅仅存在四种基本的作用力类型，我们日常生活中只会经历两种（引力和电磁力）。本书正文在需要时，会用方程式表示各种作用力。它们的基本分类如下。

引力：我们都对这种力非常熟悉。令人吃惊的是，在四种基本类型的作用力中，它是强度最小的，而且比其他三种小很多。引力存在于任何两个有质量的对象之间，而且永远存在（也就是说，永远都在忙着把不同对象吸引到一起）。

电磁力：这种力量存在于带电物体之间。世上有两种电荷，一种被称为正电（“+”，质子所带的电荷类型），另一种被称为负电（“−”，电子所带的电荷类型）。电荷同性相斥，异性相吸。这种力有两个特别之处：首先，电荷是可以量化的，可测量的电荷是电子带电量的整数倍，但没有人知道这是为什么；其次，电磁力比重力强大 $10^{40}$ 倍，这个还是没有人能解释，引力和电磁力之间的差距为什么那么大。

如果电荷处于运动状态，就会产生一个磁场。如果它来回振荡，就会产生光。这些运动中的电荷仍然是电磁作用的表现形式，但它们的性质却不像静止的电荷那样简单。我在第 3 章讲解过一点相关知识，但如果想了解深入的话，可以多读读大学一年级的物理课本。

强力：原子中的原子核由质子和中子组成。因此，其中包含很多个正电荷，它们彼此互相排斥。由于原子核并没有爆裂，所以一定存在某种力量把它们控制在一起。这种力就被称为强力，也就是核子之间的作用力。它的范围很小，不像电磁力和引力那样无处不在。基本上，明显超出 $10^{-15}$ 米范围之后，它就会完全消

失。其实，这种力是两种核子的夸克层之间的作用力。而质子和中子之间的力，只是“外泄”出来的表象而已。

弱力：这是导致某些衰变过程的力。比如中子变成质子、电子和中微子。这种力很有意思，跟其他力的不同之处是：它会区分左右，也会区分物质与反物质。它的作用范围很小，却有可能是物质能够在宇宙中存在的原因。由于物质与反物质的规模不尽相等，在宇宙大爆炸期间，物质获得了相对于反物质的极小优势（大约十亿分之一）。绝大多数物质和全部的反物质都被湮灭，剩下的那一点点物质就是我们今天看到的宇宙。

衍生力：其他所有各种力，都是基本作用力衍生出来的。化学键源自电磁力，它产生于组成分子的原子间不同电荷的作用力。摩擦力本质上也是电磁力，正如我们在宏观世界中看到的大部分其他作用力一样。张力？来自化学键。阻力？来自流体中移动对象遭遇的分子撞击。说到底，化学力就意味着电磁力。

物理学家们试图证明，全部四种作用力都是一种更基本类型的“力”的具体表现。但直到现在，所有的努力都还没有得到想要的结果。20 世纪 70 年代，格拉肖、温伯格和萨拉姆证明了电磁力与弱力之间存在根本性关联，但迄今为止的进展也不过如此。

# 参考文献


[1] BBCNews. Kepler 22-b: Earth-like planet confirmed. http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-1604655.

[2] CERN. Antimatter FAQ. http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/faq.html.

[3] Crank Dot Net. Einstein was wrong. http://www.crank.net/einstein.html.

[4] The Extrasolar Planets Encyclopedia. Catalog, s. v. "Imaging."
http://exoplanet.eu/ catalog-imaging.php.

[5] The Extrasolar Planets Encyclopedia. Catalog, s. v. "Fomalhaut."
http://exoplanet.eu/ star.php? st=Fomalhaut.

[6] NASA. NASA Discovers First Earth-Size Planets Beyond Our Solar System.
http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm? release=2011-390.

[7] NASA. NASA Hubble Telescope FAQ. http://www.spacetelescope.org/about/faq/.

[8] NASA. Kennedy Space center FAQs.
http://www.science.ksc.nasa.gov/pao/faq/ faqanswers.htm.

[9] NASA. Nuclear pulse space vehicle survey, Vol. Ⅰ (Summary). Technical report, National Aeronautics and Space Administration, Huntsville, AL, September 1964.

[10] NASA. Space settlements: A design study. Edited by Richard D. Johnson and Charles Holbrow. Technical Report NASA-SP-413, National Aeronautics and Space Administration, 1975.

[11] National Space Society. Space Settlement Design Contest 2009 Results.
http://www.nss.org/settlement/nasa/Contest/Results/2009/ASTEN.pdf.

[12] Space exploration technologies corporation. Dragon.
http://www.spacex.com/dragon.php/.

[13] Space exploration technologies corporation. Falcon 1e Pricing and Performance.
http://www.spacex.com/falcon1.php/# pricing and performance.

[14] Space.com. Endeavor's shuttle launch delay comes with a large price tag.
http://www.space.com/11525-space-shuttle-endeavour-launch-delay-cost.html.

[15] Television Tropes & Idioms. Recycled in SPACE!
http://tvtropes.org/pmwiki/pmwiki.php/Main/RecycledINSPACE.

[16] U. S. Census Bureau. Census Death Rate Statistics.
http://www.census.gov/compendia/statab/cats/transportation/motor vehicle accidents.

[17] J. Ackeret. Zur theorie der Raketen. *Helvetica Physica Acta*, 19: 103-112, 1946.

[18] Douglas Adams. *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*. Harmony Books, NewYork, 1979.

[19] Douglas Adams. *The Restaurant at the End of the Universe*. Ballantine Books, New York, 2005.

[20] Fred C. Adams and Gregory Laughlin. A dying universe: the long-term fate and evolution of astrophysical objects. *Reviews of Modern Physics*, 69(2): 337-372, 1997.

[21] Poul Anderson. *The Avatar*. Putnam, New York, 1978.

[22] Poul Anderson. *Tau Zero*. Doubleday, Garden City, NY, 1970.

[23] Poul Anderson. *The Earth Book of Stormgate*. Berkley, New York, 1978.

[24] P. K. Aravind. The physics of the space elevator. *The American Journal of Physics*, 75(2): 125-130, 2007.

[25] Svante Arrhenius and Joens Elias Fries. *The Destinies of the Stars*. G. P. Putnam's Sons, New York, 1918.

[26] Yuri P. Artutsanov. Skyhook: Old idea. Science, 158(3803): 946-947, 1967.

[27] Yuri P. Artutsanov. Into space without rockets: A new idea for space launch. *Znaniye-Sila*, 7: 25, 1969.

[28] Henri Arzeliès. *Relativistic Kinematics*. Pergamon Press, Oxford, 1966.

[29] W. L. Bade. Relativistic rocket theory. *The American Journal of Physics*, 21: 310-312, 1953.

[30] Arnold Barnett and Mary K. Higgins. Airline safety: The last decade. *Management Science*, 35(1): 1-21, 1989.

[31] Roger R Bate, Donald D. Mueller, and Jerry E. White. *Fundamentals of Astrodynamics*. Dover Publications, New York, 1971.

[32] Greg Bear. *The Forge of God*. Tor, New York, 1987.

[33] Greg Bear. *Moving Mars*. Tor, New York, 1993.

[34] Greg Bear. *Anvil of Stars*. Warner Books, New York, 1992.

[35] Edward Belbruno. *Fly me to the Moon*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2007.

[36] John S. Bell. On the Einstein-Podolsky-Roden paradox. *Physics*, I, pp. 195-200, 1964

[37] Gregory Benford and Larry Niven. *Bowl of Heaven*. Tom Doherty Associates, New York, 2012.

[38] Alfred Bester. *The Stars My Destination*, New American Library, 1956.

[39] William J. Borucki and et al. Kepler22b: A 2. 4 Earth Radius Planet in the Habitable Zone of Life of a Sun-like star (preprint). http: //arxiv. org/pdf/1112. 1640v1, December 2011.

[40] Ray Bradbury. *The Martian Chronicles*. Doubleday, Garden City, NY, 1950.

[41] Kenneth Brower. *The Starship and the Canoe*. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1978.

[42] Todd A. Brun. Computers with closed time like curves can solve hard problems efficiently. *Foundations of Physics Letters*, 16(3): 245-253, 2003.

[43] Edgar Rice Burroughs. *A Princess of Mars*. Doubleday, Garden City, NY, 1912.

[44] R. W. Bussard. Galactic matter and interstellar flight. *Astronomica Acta*, 6: 97-111, 1960.

[45] Jim Butcher. *Proven Guilty*. Roc, New York, 2007.

[46] A. G. W. Cameron, editor. *Interstellar Communication: A Collection of Reprints and Original Contributions*. W. A. Benjamin, Inc., New York, 1963.

[47] Bradley W. Carroll and Dale A. Ostlie. *An Introduction to Modern Astrophysics*, 2nd. ed. Addison-Wesley, San Francisco, CA, 2007.

[48] Hendrik G. B. Casimir. On the attraction between two perfectly conducting plates. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademic von Wetenschappen*, 51: 793-795, 1948.

[49] David Charbonneau, Timothy M. Brown, Robert W. Nayes, and Ronald L. Gilliland. Detection of an extrasolar planet atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 568: 377-384, 2002.

[50] G. K Chesterton. *The Napoleon of Notting Hill*. Dover Publications, New York, 1991.

[51] C. B. Clark. Experience in a non-inertial lab. *Physics Teacher*, 17: 526, 1979.

[52] Arthur C. Clarke. *Childhood's End*. Harcourt, Brace & World, New York, 1953.

[53] Arthur C. Clarke. *The City and the Stars*. Harcourt, Brace, New York, 1956.

[54] Arthur C. Clarke. *Profiles of the future*, rev. ed. Harper and Row, New York, 1973.

[55] Arthur C. Clarke. *The Promise of Space*. Harper & Row, New York, 1968.

[56] Arthur C. Clarke. *The Fountains of Paradise*. Harcourt Brace Jovanovich, NewYork, 1979.

[57] Arthur C. Clarke. 2010: *Odyssey Two*. Ballantine Books, New York, 1982.

[58] Arthur C. Clarke and Stanley Kubrick. 2001: *A Space Odyssey*. Hutchinson, London, 1968.

[59] Hal Clement. *Mission of Gravity*. Doubleday, Garden City, NY, 1954.

[60] Giuseppe Cocconi and Philip Morrison. Search for interstellar communications. *Nature*, 184: 844-846, 1959.

[61] Paul J. Crutzen and Eugene F. Stoermer. The " anthropocene ". *Global Change Newsletter*, 41: 17-18, May 2000.

[62] Ingri D'Aulaire and Edgar Parin D'Aulaire. *D'Aulaire's Book of Norse Mythology*. The New York Review of Books, New York, 1967.

[63] J. Dennis and L. Choate. Some problems with artificial gravity. *Physics Teacher*, 8: 441, 1970.

[64] Jared Diamond. The Third Chimpanzee: *The Evolution and Future of the Human Animal*. Harper Collins Publishers, New York, 1992.

[65] Jared Diamond. *Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies*. W. W. Norton & Company, New York, 1999.

[66] Jared M Diamond. *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Viking, New York, 2005.

[67] Philip K Dick. *Ubik*. Doubleday, Garden City, NY, 1969.

[68] Philip K Dick. *Galactic Pot-Healer*. Vintage Books, New York, 1994.

[69] John D. Durand. Historical estimates of world population: An evaluation. *Population and Development Review*, 3(3): 253-296, 1977.

[70] Damien Duvier and Michel Wautelet. From the microworld to King Kong, *Physics Education*, 41: 386-390, 2006

[71] Freeman Dyson. Search for artificial stellar sources of infrared radiation. *Science*, 131 (1341): 1667-1668, June 1960.

[72] Freeman Dyson. Interstellar transport. *Physics Today*, pages 41-45, October 1968.

[73] Freeman Dyson. Time without end: Physics and biology in an open universe. *Reviews of Modern Physics*, 51(3): 447-460, 1979.

[74] Freeman Dyson. The search for extraterrestrial technology. In *Selected Papers of Freeman Dyson*, 557-571. American Mathematical Society, 1996.

[75] George Dyson. *Project Orion: The True Story of the Atomic Spaceship*. Henry Holt and Co. , 2002.

[76] Bradley C. Edwards. *The space elevator: Niac phase 1 report*. Technical report, NASA Institute for Advanced Concepts, 2001.

[77] Bradley C. Edwards. *The space elevator: Niac phase 2 report*. Technical report, NASA Institute for Advanced Concepts, 2003.

[78] A. Einstein, B. Podolsky, and N Rosen. Can Quantum-mechanical description of reality be considered complete? *Physics Review*, 47: 777-780, 1935.

[79] Robert Erlich. Faster-than-light speeds, tachyons, and the possibility of tachyonic neutrinos. *American Journal of Physics*, 71(11): 1109-1114, 2003.

[80] Gerald Feinberg. Possibility of faster-than-light particles. *Physical Review*, 159(5): 1089-1105, 1967.

[81] Richard P. Feynman. *The Character of Physical Law*. The M. I. T. Press, Cambridge, MA, 1967.

[82] Richard P. Feynman, Anthony J. G. Hey, and Robin W. Allen. *The Feynman Lectures on Computation*. Addison-Wesley, New York, 1996.

[83] Richard P Feynman and Ralph Leighton. "*What DO YOU Care What Other People Think?*": *Further Adventures of a Curious Character*. Norton, NewYork, 1988.

[84] Richard P Feynman, Ralph Leighton, and Edward Hutchings. "*Surely You're Joking, Mr. Feynman!*": *Adventures of a Curious Character*. W. W. Norton, New York, 1985.

[85] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley, 1963.

[86] Martyn J. Fogg. *Terraforming: Engineering Planetary Environments*. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, 1995.

[87] Robert L. Forward. Antiproton annihilation propulsion. Technical Report ADA160 734, Air Force Rocket Propulsion Laboratory, 1985.

[88] Robert H. Frisbee. How to build an antimatter rocket for interstellar missions. In *Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, pages AIAA-2003-4676, July 2003.

[89] Lo-Shu Fu. *Teng Mu: A forgotten Chinese philosopher*. T'oung Pao, 52: 35-96, 1965.

[90] Galileo Galilei and Stillman Drake. *Dialogues Concerning Two New Sciences, Including Centers of Gravity & Force of Percussion*. University of Wisconsin Press, 1974.

[91] Hugo Gernsback. *Ralph* 124C41 +: *A Romance of the Year* 2660. The Stratford company, Boston, Mass., 1925.

[92] David Gerrold. *A Matter for Men*. Simon and Schuster, New York, 1983.

[93] David Gerrold. *Jumping Off the Planet*. Tor, New York, 2000.

[94] David Gerrold. *Worlds of Wonder: How to Write Science Fiction&Fantasy*. Writer's Digest Books, Cincinnati, OH, 2001.

[95] William Gibson. *Neuromancer*. Ace Books, New York, 1984.

[96] William Gibson. *Mona Lisa Overdrive*. Bantam Books, Toronto, 1988.

[97] Samuel Glasstone and Philip J. Dugan. *The Effects of Nuclear Weapons*. United States Department of Defense, Washington, D. C., 1977.

[98] Robert Goddard. A method of reaching extreme altitudes. *Smithsonian Miscellaneous*

Collections, 71(2): 1-71, 1919.

[99] Herbert Goldstein. *Classical Mechanics*. 2nd edition, Reading, Addison-Wesley, MA, 1980.

[100] Guillermo Gonzalez. The galactic habitable zone. In *Astrophysics of Life*, ed. Mario Livio, I. Neill Reid, and William B. Sparks, 89-97. Cambridge University Press, 2005.

[101] David L. Goodstein, Richard P Feynman, and Judith R Goodstein. *Feynman's Lost Lecture: The Motion of Planets Around the Sun*. Vintage, London, 1997.

[102] D. J. Griffins, *Introduction to Quantum Mechanics*, 2nd ed. Pearson-Prentice Hall, Saddle River, NJ, 2000.

[103] Lev Grossman. *The Magicians*. Viking, New York, 2009.

[104] H. Chen et al. Relativistic positron creation using ultraintense short pulse lasers. *Physical Review Letters*, 102: 105001-1-4, 2009.

[105] Thomas Hager. *The Alchemy of Air: A Jewish genius, a Doomed Tycoon, and the Scientific Discovery that Fed the World but fueled the rise of Hitler*. Crown, New York, 2008.

[106] J. B. S Haldane. *Possible Worlds and Other Essays*. Chatto & Windus, London, 1927.

[107] Joe W Haldeman. *The Forever War*. St. Martin's Press, New York, 1974.

[108] Robert A Heinlein. *Red Planet*. rev. ed. Ballantine, New York, 1947.

[109] Robert A Heinlein. *Rocket Ship Galileo*. Scribner, New York, 1947.

[110] Robert A Heinlein. *Space Cadet*. Ballantine Books, 1948.

[111] Robert A Heinlein. *Farmer in the Sky*. Scribner, New York, 1950.

[112] Robert A Heinlein. *Starman Jones*. Ballantine Books, New York, NY, 1953.

[113] Robert A Heinlein. *Time for the Stars*. Scribner, New York, 1956.

[114] Robert A Heinlein. *Have Space Suit-Will Travel*. Scribner, New York, 1958.

[115] Robert A Heinlein. *Stranger in a Strange Land*. Putnam, New York, 1961.

[116] Robert A Heinlein. *Glory Road*. Putnam, New York, 1963.

[117] Robert A Heinlein. *Orphans of the Sky*. Putnam, New York, 1963.

[118] Robert A Heinlein. *Podkayne of Mars*. Putnam, New York, 1963.

[119] Robert A Heinlein. *The Moon is a Harsh Mistress*. Putnam, New York, 1966.

[120] Robert A Heinlein. *The Number of the Beast*. Fawcett Columbine, New York, 1980.

[121] Robert A Heinlein. *Expanded Universe*. Baen, Riverdale, NY, 2003.

[122] Robert A Heinlein and Clifford N. Geary. *Starman Jones*. Scribner, New York, 1953.

[123] T. A. Heppenheimer. On the infeasibility of interstellar ramjets. *Journal of the*

*British Interplanetary Society*, 31: 221-224, 1978.

[124] Walter Hohmann. *The Attainability of Heavenly Bodies*. NASA Technical Translation F-44, 1961.

[125] Walter Hoppe, editor. *Biophysics*. Springer-Verlag, Berlin, 1983.

[126] M. King Hubbert. *Nuclear energy and the fossil fuels*. Technical Report 95, Shell Development Company, June 1956.

[127] M. King Hubbert. The world's evolving energy system. *American Journal of Physics*, 49(11): 1007-1029, 1981.

[128] John D. Isaacs, et al. Satellite elongation into a true "skyhook". *Science*, 151(3711): 682-683, 1966.

[129] Daniel J. Jacob. *An Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.

[130] Jeff Hester et al. *21st Century Astronomy*, 2nd. ed. W. W. Norton, New York, 2007.

[131] Chuck Jones. Chuck Amuck: *The Life and Times of an Animated Cartoonist*. Farrar Straus Giroux, New York, 1989.

[132] Eric M. Jones. "*Where is Everybody?*": An account of Fermi's question. Technical Report LA-10311-MS, Los Alamos National Lab, Los Alamos, NM, 1985.

[133] W. Jones. Earnshaw's theorem and the stability of matter. *European Journal of Physics*, 1: 85-88, 1980.

[134] J. F. Kasting, O. B. Toon, and J. B. Pollack. How climate evolved on the terrestrial planets. *Scientific American*, 256(2): 90-97, 1988.

[135] James F. Kasting and David Catling. Evolution of a habitable planet. *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 41: 429-463, 2003.

[136] James F. Kasting, Daniel P. Whitmire, and Ray T. Reynolds. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101: 108-128, 1993.

[137] N. Y. Kiang. The color of plants on other worlds. *Scientific American*, 298(4): 48-55, 2008.

[138] N. Y. Kiang and et al. Spectral signatures of photosynthesis I: Review of earth organisms. *Astrobiology*, 7: 222-251, 2007.

[139] N. Y. Kiang and et al. Spectral signatures of photosynthesis II: Coevolution with other stars and the atmosphere on extrasolar worlds. *Astrobiology*, 7: 252-274, 2007.

[140] Max Kleiber. *The Fire of Life: An Introduction to Animal Energetics*. John Wiley and Sons, New York, 1961.

[141] Elizabeth Kolbert. *Field Notes from a Catastrophe: Man, Nature, and Climate*

Change. Bloomsbury Pub. , New York, 1st u. s. ed edition, 2006.

[142] D. G. Korycansky, G. Laughlin, and F. C. Adams. Astronomical engineering: A strategy for modifying planetary orbits. *Astrophysics* and *Space Science*, 275: 349-366, 2001.

[143] Rolf Landauer. Irreversability and heat generation in the computing process. *IBM Journal of Research Development*, 5: 183, 1961.

[144] J. Laskar and P. Robutel. The chaotic obliquity of the planets. *Nature*, 361: 608-612, 1993.

[145] Ursula K. Le Guin. *The Left Hand of Darkness*. Harper & Row, New York, 1969.

[146] Alfred Leick. *GPS Satellite Surveying*, 2nd ed. JohnWiley and Sons, New York, 1995.

[147] Stanislaw Lem. *His Master's Voice*. Harcourt Brace Jovanovich, San Diego, 1968.

[148] Stanislaw Lem. *Solaris*. Harcourt Brace Jovanovich, San Diego, 1970.

[149] Stanislaw Lem. *A Perfect Vacuum*. Harcourt Brace Jovanovich, New York, 1979.

[150] Stanislaw Lem. *Microworlds*. Harcourt, Brace & Company, San Diego, CA, 1984.

[151] Stanislaw Lem. *Fiasco*. Harcourt Brace Jovanovich, New York, 1988.

[152] Madeleine L'Engle. *A Wrinkle in Time*. Farrar, Straus, and Giroux, New York, 1962.

[153] Mario Livio. *The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos*. Wiley, New York, 2000.

[154] Edward N. Lorenz. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20: 130-141, 1963.

[155] Percival Lowell. *Mars*. Houghton Mifflin, Boston, 1895.

[156] John Maddox, Poul Anderson, Eugene A. Sloan, and Freeman Dyson. Artificial biospheres. *Science*, 132: 250-253, 1960.

[157] Michael E. Mann and Lee R Kump. *Dire Predictions: Understanding Global Warming*. DK Publishing, London, 2008.

[158] Anthony R. Martin. Some limitations of the interstellar ramjet. *Spaceflight*, 14: 21-25, 1972.

[159] Anthony R. Martin. Magnetic intake limitations on interstellar ramships. *Astronomica Acta*, 18: 1-10, 1973.

[160] John H. Mauldin. *Prospects for Interstellar Travel*. Science and Technology Series 80. American Astronautical Society, 1992.

[161] James Clerk Maxwell. *On the Stability of the Motion of Saturn's Rings*. MacMillan, London, 1856.

[162] Colin McInnes. Non-linear dynamics of Ring World systems. *Journal of the British Interplanetary Society*, 56: 308-313, 2003.

[163] Christopher P. McKay and Wanda L. Davis. Duration of liquid water habitats on early Mars. *Icarus*, 90: 214-221, 1991.

[164] John McPhee. *The Curve of Binding Energy*. Farrar, Straus and Giroux, New York, 1974.

[165] N. David Mermin. *It's about Time: Understanding Einstein's Relativity*. Princeton University Press, Princeton., 2005.

[166] N. David Mermin. *Quantum Computer Science: An Introduction*. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

[167] Robert A. Mole. Terraforming Mars with four war surplus bombs. *Journal of the British Interplanetary Society*, 48(7): 321-324, 1995.

[168] Michael S. Morris and Kip Thorne. Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity. *The American Journal of Physics*, 56(5): 395-412, 1988.

[169] Michael S. Morris, Kip Thorne, and Ulvi Yurtsaever. Wormholes, time machines and the weak energy condition. *Physical Review Letters*, 61(13): 1446-1449, 1988.

[170] D. J. Mullan. Why is the sun so large? *American Journal of Physics*, 74(1): 10-13, 2006.

[171] Thomas Muller. Visual appearance of a Morris-Thorne wormhole. *American Journal of Physics*, 72(8): 1045-1050, 2004.

[172] Randall Munroe. xkcd: Quantum teleportation. http://xkcd.com/465/.

[173] Paul J Nahin. *The Logician and the Engineer: How George Boole and Claude Shannon Created the Information Age*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2012.

[174] Paul J Nahin. *Time Machine: Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*. American Institute of Physics Press, New York 1993.

[175] Larry Niven. *A Gift from Earth*. Walker, New York, 1968.

[176] Larry Niven. *Neutron Star*. Ballantine Books, New York, 1968.

[177] Larry Niven. *Ringworld*. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1970.

[178] Larry Niven. *All the Myriad Ways*. Ballantine Books, 1971.

[179] Larry Niven. *Protector*. Ballantine Books, New York, 1973.

[180] Larry Niven. *A Hole in Space*. Ballantine Books, New York, 1974.

[181] Larry Niven. *Tales of Known Space*. Ballantine Books, New York, 1975.

[182] Larry Niven. *A World Out of Time*. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1976.

[183] Larry Niven. *The Ringworld Engineers*. Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1980.

[184] Larry Niven. *Convergent Series*. Del Rey, New York, 1986.

[185] Larry Niven and Brenda Cooper. *Building Harlequin's Moon*. Tor, New York, 2005.

[186] Larry Niven and Jerry Pournelle. *The Mote in God's Eye*. Simon and Schuster, New York, 1974.

[187] Larry Niven and Jerry Pournelle. *Footfall*. Del Rey, New York, 1985.

[188] Gerard K. O'Neill. The colonization of space. *Physics Today*, pages 32-40, September 1974.

[189] Gerard K. O'Neill. *The High Frontier: Human Colonies in Space*. William Morrow, New York, 1977.

[190] J. Pearson. The orbital tower: A spacecraft launcher using the earth's rotational energy. *Acta Astronautica*, 2: 785-799, 1975.

[191] C. J Pennycuick. *Bird Flight Performance: A Practical Calculation Manual*. Oxford University Press, Oxford, 1989.

[192] Henri Poincare. *The Foundations of Science*. The Science Press, New York, 1929.

[193] J. B. Pollack, J. F. Kasting, S. M. Richardson, and K. Poliakoff. The case for a warm, wet climate on early Mars. *Icarus*, 71: 203-224, 1987.

[194] Michael Pollan. *The Omnivore's Dilemma: A Natural History of Four Meals*. Penguin Press, New York, 2006.

[195] Tim Powers. *On Stranger Tides*. Ace Books, New York, 1987.

[196] Tim Powers. *Last Call*. Morrow, New York, 1992.

[197] Richard Rhodes. *The Making of the Atomic Bomb*. Simon and Schuster, New York, 1986.

[198] Wolfgang Rindler. *Special Relativity*, 2nd. ed. Oliver and Boyd, London, 1966.

[199] Kim Stanley Robinson. *Forty Signs of Rain*. Bantam Books, New York, 2004.

[200] A. Robock et al. Climatic consequences of regional nuclear conflicts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(8): 2003-2012, 2007.

[201] J. K Rowling. *Harry Potter and the Sorcerer's Stone*. A. A. Levine Books, New York, 1998.

[202] J. K Rowling. *Harry Potter and the Prisoner of Azkaban*. Arthur A. Levine Books, New York, 1999.

[203] J. K Rowling. *Harry Potter and the Goblet of Fire*. Arthur A. Levine Books, New York, 2000.

[204] J. K Rowling. *Harry Potter and the Order of the Phoenix*. Arthur A. Levine Books,

New York, 2003.

[205] J. K. Rowling. *Harry Potter and the Half-Blood Prince*. Arthur A. Levine Books, New York, 2005.

[206] J. K Rowling. *Harry Potter and the Deathly Hallows*. Arthur A. Levine Books, New York, 2007.

[207] Qian D. Ruoff, R. S. andW. K. Liu. Mechanical properties of carbon nanotubes. *Comptes-Rendus Physique*, 4: 993-1008, 2003.

[208] Carl Sagan. Planetary engineering on mars. *Icarus*, 20: 513-514, 1973.

[209] Carl Sagan. *Contact*. Simon and Schuster, New York, 1985.

[210] J. L. Sanders. Advanced post-*Saturn* Earth launch vehicle study: Executive summary report. Technical Report TM X-53200, National Aeronautics and Space Administration, 1965.

[211] Hans Joachin Schellnhuber, Paul J. Crutaen, William C. Clark, and Julian Hunt. Earth systems analysis and sustainability. *Environment*, 47(8): 11-25, 2005.

[212] A. G. Schmidt. Coriolis acceleration and conservation of angular momentum. *The American Journal of Physics*, 54: 755, 1986.

[213] Sara Seager and Drake Deming. Exoplanet atmospheres. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 48(1): 631-672, 2010.

[214] Antigona Segura et al. Ozone concentrations and ultraviolet fluxes on earthlike planets around other stars. *Astrobiology*, 3: 689-708, 2003.

[215] Claude Semay and Bernard Silvestre-Brac. Equation of motion of an interstellar Bussard ramjet with radiation loss. *Acta Astronautica*, 61: 817-822, 2007.

[216] Charles Sheffield. *The Web Between the Worlds*. Ace Books, New York, 1979.

[217] Charles Sheffield. *The Compleat McAndrew*. Baen Books, Riverdale, NY, 2000.

[218] Michael Shermer. Why ET hasn't called. *Scientific American*, August 2002.

[219] Daniel Simmons. *Hyperion*. Doubleday, New York, 1989.

[220] Daniel Simmons. *The Fall of Hyperion*. Doubleday, New York, 1989.

[221] E. E Smith. *First Lensman*. Fantasy Press, Reading, Pa., 1950.

[222] George O Smith. *The Complete Venus Equilateral*. Ballantine Books, New York, 1976.

[223] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, ed. *IPCC*, 2007: *Climate Change* 2007: *The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2007.

[224] Walter S. Stahl. Scaling of respiratory variables in mammals. *Journal of Applied Physiology*, 22(3): 453-460, 1967.

[225] Olaf Stapledon. *Last and First Men & Star Maker*. Dover Publications, New York, 1968.

[226] John Steinbeck. *The Grapes of Wrath*. The Viking press, New York, 1939.

[227] Arthur Stinner and John Begoray. Journey to Mars: The physics of traveling to the red planet. *Physics Education*, 40(1): 35-45, 2005.

[228] S. M. Stirling. *The Stone Dogs*. Baen Books, Wake Forest, N. C., 1990.

[229] S. M Stirling. *The Sky People*. Tor, New York, 2006.

[230] Arkady Strugatsky and Boris Strugatsky. *Roadside Picnic & Tale of the Troika*. Macmillan, New York, 1977.

[231] Yuri M. Svirezhev. Non-linearities in mathematical ecology: Phenomena and models. *Ecological modeling*, 216(2): 89-101, 2008.

[232] Victor Szebehely. *Theory of Orbits: The Restricted Problem of Three Bodies*. Academic Press, New York, 1967.

[233] T. Coan et al. A compact apparatus for muon lifetime measurement and time dilation demonstration in the undergraduate laboratory. *The American Journal of Physics*, 74 (2): 161-162, 2006.

[234] Edwin F Taylor and John Archibald Wheeler. *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity*. W. H. Freeman, New York, 2nd ed edition, 1992.

[235] Edwin F. Taylor and John Archibald Wheeler. *Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity*. Addison-Wesley-Longman, 2000.

[236] Kip S Thorne. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. Norton, New York, 1994.

[237] Frank J. Tipler. Rotating cylinders and the possibility of global causality violation. *Physical Review D*, 9(8): 2203-2206, 1974.

[238] Akira Tmizuka. Estimation of the power of greenhouse gases on the basis of absorption spectra. *American Journal of Physics*, 78(4): 359-366, 2010.

[239] Virginia Trimble. Cosmology: Man's place in the universe, a deconstruction. *The American Journal of Physics*, 70(12): 1175-1183, 2002.

[240] S. M. Ulam. *Analogies Between Analogies: The Los Alamos Reports of S. M. Ulam*. University of California Press, 1990.

[241] Jules Verne. *De la Terreà la Lune*. J. Hetzel et cie, Paris, 1866.

[242] Matt Visser. *Lorentzian Wormholes*. American Institute of Physics, Woodbury, NY, 1996.

[243] Steven Vogel. *Comparative Biomechanics: Life's Physical World*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2003.

[244] Sarah Vowell. *Assassination Vacation*. Simon & Schuster, New York, 2005.

[245] David Walker and Richard Walker. *Energy, Plants and Man*, 2nd. ed. Oxygraphics, Ltd., 1992.

[246] Jearl Walker. *Fundamentals of Physics*, 8th extended ed. John Wiley and Sons, 2008.

[247] Peter D. Ward and Donald Brownlee. *Rare Earth*. Copernicus, New York, NY, 2000.

[248] H. G. Wells. *The War of the Worlds*. Harper & Brothers, New York, 1898.

[249] H. G Wells. *The First Men in the Moon*. G. Newnes, London, 1901.

[250] John Archibald Wheeler and Richard Phillips Feynman. Interaction with the absorber as the mechanism of radiation. *Review of Modern Physics*, 17: 157-181, 1945.

[251] T. H White. *The Once and Future King*. Collins, London, 1958.

[252] Clifford M. Will. *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*. Basic Books, New York, 1986.

[253] Gene Wolfe. *The Fifth Head of Cerberus*. Scribner, New York, 1972.

[254] Gene Wolfe. *The Citadel of the Autarch*, Vol. 4 of *Book of the New Sun*. Timescape Books, New York, 1983.

[255] W. K. Wootters and W. H. Zurek. A single quantum cannot be cloned. *Nature*, 299: 802-803, October 1982.

[256] Robert M. Zubrin and Christopher P. McKay. Technological requirements of terraforming Mars. In *Bringing Mars to Life*, ed. R. L. S. Taylor. British Interplanetary Society, 1994.

# 译后记　让科幻回归科学

科幻与科学，像是一对双生子。

有的西方科幻史家认为，科幻诞生于倡导逻辑与理性的古希腊，有的则认为诞生于工业革命时期的英国，但两者都在科学肇始与发源的地方。

科学始终在为科幻提供营养。对火星的观测造就了小说中的大批火星人；戴森球催生了环形世界；相对论滋养了时间旅行者；计算机网络则延伸出黑客帝国。基本上，科学负责给科幻搭建舞台，而科幻负责让科学变得更酷。

科幻界也始终流传着一些科学佳话，比如克拉克提出过全球无线通信系统设想，吉布森作品预言了赛博空间，阿西莫夫设计了机器人三原则，等等。有些传闻，可能有那么一点点附会的地方，但无一例外，都昭示着科学与科幻的因缘。

而这本书，就是在让科幻回归科学。

它讲科幻，但作者却是一位科学家，他用严谨到近乎物理课堂的气氛，讲述有关硬科幻的方方面面。

而且，作者不是仅仅靠自己研究，更是吸取了历代科幻主题研究的精华，集中了波尔·安德森、拉里·尼文、弗里曼·戴森、阿瑟·克拉克、奥拉夫·斯塔普尔顿以及阿尔伯特·爱因斯坦等一大批科幻和科学界的最强大脑，共同探索宇宙、生命，以及一切。

没错，包括道格拉斯·亚当斯在内的科幻作家团也会带着他们的作品集体“亮相”，从《世界之战》到《路边野餐》，从《神经漫游者》到《海伯利安》，从《移动火星》到《天堂碗》，科幻小说踩着科学的步调华丽登场，有选段、有简介，还有或褒或贬的评价。你会看到海因莱因大师奇思妙想的来源和短板，你会看到拉里·尼文如何提出难倒一众科学家的难题，你会看到电影《阿凡达》中最大的漏洞，你会知道如果《星际迷航》中的细节成为现实将意味着人类发达到何种地步。

你将经历一些难忘的瞬间：遇见巨人、龙、美人鱼和鹰头飞马；计算火箭推力和太空度假成本；设计太空电梯、巡弋在拉格朗日点的空间站；了解最强大、脑洞也最大的“猎户座”推进器，以及核弹与可口可乐配送系统的关联；利用行星作“弹弓”，把旅行者一号送出太阳系；了解恒星类别和亲吻是什么关系；改造火星；认识“古戈”这个听起来很酷，却极难用到的数字；寻找建造虫洞的神奇材料；遭遇太空海盗；活到所有恒星熄灭时，依靠往黑洞里面扔垃圾的方法制造能源……

最神奇的是：这一切居然很简单。作者只用了相当于我国初中物理课的相关常识，以及大约高中低年级水准的数学，再加了一点点微积分，微积分居然还不是必需的……

作者自己说，这本书是写给 15 岁时的自己，当时那个爱读科幻，却常常有些茫然的小少年。本书适合的读者年龄下限，大约就在初中高年级这个层次上。如果有些神奇的小学生已经开始读科幻小说，那么读这本书恐怕也不在话下。

任何文科背景的科幻爱好者，应该都能学到不少知识。科幻作者，如果不是极度渊博，大约也会找到一些自己想要的信息。专业重合的读者，可能找不到太多科学知识方面的亮点，但依然可以把本书当作一本科幻世界导游手册来用。正如美国版封面的推荐所说：“它会吸引所有的读者，从《星际迷航》的狂热粉丝到天体物理学家。”

有人说，科幻是一种美国化的文学表达形式。它追求宏大而壮阔的世界格局，倡导发现与征服，有时显得盲目乐观，但任何时候，都没有传统文学形式过于怀旧和伤感的一面。

此前看到别人探讨美国科幻创作繁荣的原因，提到他们为科幻作家开设的课程、培训等等。有些东西难以照搬，有些可能也没有绝对的必要。但像这本书这样的“干货”，如果能“搬运”回来，还是很有意义的。

译者在完成一项长期工作的过程中，会不知不觉变得有些像作者。阿德勒先生文字中体现出来的个性，是有几分天真，偶尔会卖个萌；他写作严谨而勤勉，心态上却非常年轻。翻译这本书，对我来讲，是一次非常愉快的工作经历，也希望它能给读者带来同样的阅读乐趣。

雒　城

2015 年 3 月